



**TUGAS AKHIR TF141581**

**PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR  
(PLTA) SEBAGAI PEMANFAATAN AIR KELUARAN  
*DISCHARGE CHANNEL* PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA UAP (PLTU) DENGAN SIMULINK**

**ALVIEN KURNIAWAN SOSILO**  
NRP. 2412 100 070

Dosen Pembimbing  
Harsono Hadi, Ph.D.  
Ir. Roekmono, M.T.

JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT TF141581**

# **MODELLING OF HYDRO POWER PLANT AS AN UTILIZATION OF DISCHARGE CHANNEL WATER OF VAPOR POWER PLANT USING SIMULINK**

**ALVIEN KURNIAWAN SOSILO**  
NRP. 2412 100 070

Supervisor  
Harsono Hadi, Ph.D.  
Ir. Roekmono, M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

## LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR  
(PLTA) SEBAGAI PEMANFAATAN AIR KELUARAN  
*DISCHARGE CHANNEL* PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA UAP (PLTU) DENGAN SIMULINK

### TUGAS AKHIR

Oleh:

ALVIEN KURNIAWAN SOSILO  
NRP. 2412 100 070

Surabaya, Januari 2016  
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Harsono Hadi, Ph.D.

NIP. 196001191986011001


Pembimbing II



Ir. Roekmono, M.T.

NIP. 195809081986011001

Ketua Jurusan  
Teknik Fisika, FTI – ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 197809022003121002

## LEMBAR PENGESAHAN

**PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR  
(PLTA) SEBAGAI PEMANFAATAN AIR KELUARAN  
DISCHARGE CHANNEL PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA UAP (PLTU) DENGAN SIMULINK**

### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ALVIEN KURNIAWAN SOSILO**  
**NRP 2412 100 070**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Harsono Hadi, Ph.D.

(Pembimbing I)

2. Ir. Roekmono, M.T.

(Pembimbing II)

3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA.

(Ketua Tim Penguji)

4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.

(Penguji I)

5. Murry Raditya, S.T., M.T.

(Penguji II)

**SURABAYA,**  
**JANUARI 2016**

# PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA) SEBAGAI PEMANFAATAN AIR KELUARAN *DISCHARGE CHANNEL* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DENGAN SIMULINK

**Nama** : Alvien Kurniawan Sosilo  
**NRP** : 2412 100 070  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D.  
Ir. Roekmono, M.T.

## **Abstrak**

*Unit kondensor pada PLTU berfungsi untuk mendinginkan uap bekas keluaran turbin. Pada proses tersebut, kondensor membutuhkan air masukan sebagai media pendingin uap melalui skema pertukaran panas. Setelah digunakan untuk mendinginkan uap, air akan dibuang melalui saluran discharge channel. Belum adanya pemanfaatan air keluaran discharge channel ini memunculkan gagasan untuk memanfaatkannya sebagai PLTA. Data dari lapangan menunjukkan air keluaran discharge channel mempunyai debit  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  dan head 4 m. Kondisi tersebut dapat dimanfaatkan dengan pemasangan komponen – komponen PLTA seperti turbin, gearbox, dan generator. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan skema turbin optimal yang berpengaruh pada torsi, daya, dan efisiensi komponen. Skema turbin optimal ini salah satunya mencakup penentuan pitch angle, yaitu sudut antara propeller turbin dan hub. Penelitian diawali dengan menentukan jenis dan dimensi turbin yang sesuai dengan kondisi lapangan. Diperoleh hasil, turbin air yang dapat digunakan adalah turbin Kaplan dengan D (diameter turbin) 1,08 m; d (lebar propeller) 0,54 m; h (tinggi propeller) 0,16 m; dan Z (jumlah propeller) 4 bilah. Skema tersebut diuji dengan penurunan persamaan torsi dari persamaan momentum implus dengan bantuan software Simulink. Diperoleh hasil, pitch angle optimal untuk kondisi tersebut adalah  $17^\circ$  dengan torsi 3.249,7 Nm, daya 125 kW, efisiensi turbin 41,95%, kecepatan rotor 269,3 rad/s, torsi elektrik - 143,5 Nm, dan daya elektrik -38,65 kW pada gear ratio optimal 7.*

*Kata Kunci: discharge channel, turbin Kaplan, pitch angle.*





*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

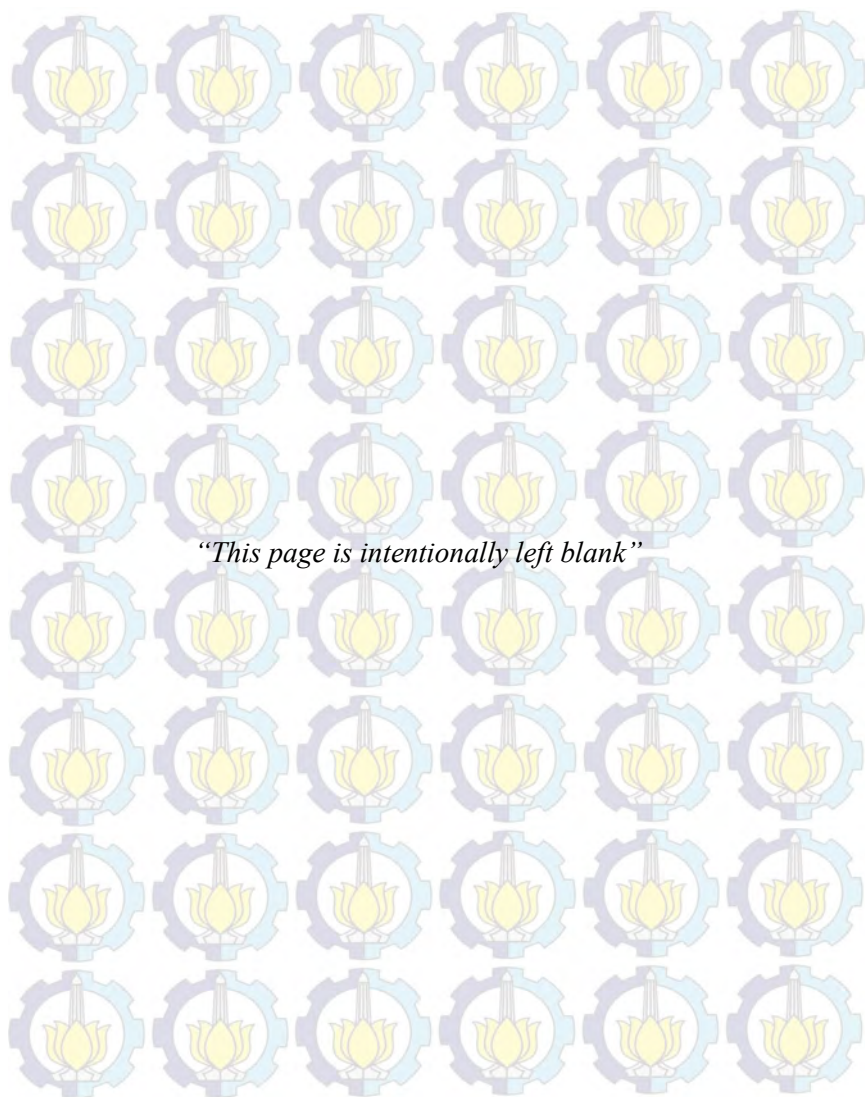
# MODELLING OF HYDRO POWER PLANT AS AN UTILIZATION OF DISCHARGE CHANNEL WATER OF VAPOR POWER PLANT USING SIMULINK

**Name** : Alvien Kurniawan Sosilo  
**NRP** : 2412 100 070  
**Department** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Supervisor** : Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D.  
Ir. Roekmono, M.T.

## ***Abstract***

A condenser unit in power plant is used to condense vapor after it hits the turbine. In this process, condenser requires inlet water as a cooling medium through heat exchanger scheme. After being used to condense vapor, the water is thrown away by discharge channel. There haven't been any effort to utilize this discarded water so this will be interesting topic for research in hydro power plant. Data from field shows the water has discharge rate  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  and head 4 m. That condition can be utilized by installing hydro power plant components, like: turbine, gearbox, and generator. The objective of this research is finding optimum turbine scheme effecting torque, power, and efficiency of components. One of the parameter is pitch angle, an angle between propeller and hub. This research is started by determining the type and dimension of turbine matched with field condition. The results turn out water turbine that can be used is Kaplan turbine with D (turbine diameter) 1.08 m; d (propeller width) 0.54 m, h (propeller height) 0.16 m, and Z (number of propeller) 4 units. This scheme is tested by deriving the torque equation from momentum impulse equation with Simulink software. The results turn out that optimum pitch angle for this condition is  $17^\circ$  with torque produced 3.249,7 Nm, power 125 kW, turbine efficiency 41,95%, rotor angular speed 269,3 rad/s, electrical torque - 143,5 Nm, and electrical power -38,65 kW at optimum gearbox ratio 7.

*Keyword: discharge channel, Kaplan turbine, pitch angle.*





## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, puji syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, serta limpahan kesehatan dan petunjuk bagi penulis. Shalawat serta salam juga senantiasa penulis curahkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir beserta pembuatan laporan yang berjudul:

### **PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR (PLTA) SEBAGAI PEMANFAATAN AIR KELUARAN *DISCHARGE CHANNEL* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DENGAN SIMULINK**

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan bagi seorang mahasiswa dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam kesempatan kali ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, khususnya kepada :

1. Kedua orangtua penulis yang tiada hentinya memberikan doa dan dukungan baik secara moril maupun materiil sedari penulis kecil hingga menjadi sebesar ini.
2. Bapak Harsono Hadi, Ph.D. dan Bapak Ir. Roekmono, M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan arahan dan pencerahan kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
3. Bapak Hendra Cordova, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika FTI ITS.

4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. atas inspirasi dan motivasi yang diberikan kepada penulis.
5. Bapak Agus Muhamad Hatta S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Fisika, FTI – ITS.
6. Bapak Ir. Sarwono, M.M. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian atas segala saran dan kemudahan dalam mengembangkan kemampuan di laboratorium.
7. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Fisika FTI ITS, khususnya dosen bidang minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala pemberian ilmu yang tulus sehingga penulis dapat menyelesaikan kuliah sampai tugas akhir ini.
8. Teman - teman asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala keceriaan dan kebersamaan selama ini.
9. Teman – teman sesama pejuang tugas akhir atas kebersamaan dan solidaritas dalam memperjuangkan tugas akhir ini hingga selesai.
10. Seluruh keluarga dari penulis yang telah memberikan semangat dan doa.
11. Teman - teman angkatan 2012, kakak – kakak angkatan 2009, 2010, dan 2011 serta adik - adik angkatan 2013 dan 2014 atas segala kebersamaan selama penulis berkuliah.

Penulis sangat menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan untuk menyempurnakan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xix
DAFTAR NOTASI .....	xxi
BAB I	
PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II	
TEORI PENUNJANG	
2.1 Kondenser .....	5
2.2 <i>Discharge Channel</i> .....	7
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air .....	8
2.4 Turbin Air .....	9
2.5 <i>Gearbox</i> .....	15
2.6 Generator .....	16
2.7 Generator Induksi .....	17
BAB III	
METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	21
3.2 Studi Literatur .....	22
3.3 Pengambilan Data .....	22
3.4 Diagram Blok Sistem .....	23



3.5 Penentuan Parameter untuk Pemodelan .....	26
3.6 Pemodelan Torsi Turbin.....	31
3.7 Parameter Input.....	34
3.8 Analisis Hasil Pemodelan.....	36

## BAB IV

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hubungan <i>Pitch Angle</i> dengan Torsi Turbin dan Daya Mekanik Turbin.....	37
4.2 Hubungan <i>Pitch Angle</i> dengan Efisiensi Turbin .....	38
4.3 Hubungan <i>Pitch Angle</i> dengan Kecepatan Putaran Rotor Generator.....	39
4.4 Hubungan <i>Pitch Angle</i> dengan Torsi Elektrik.....	40
4.5 Hubungan <i>Pitch Angle</i> dengan Daya Elektrik.....	41
4.6 Skema Turbin Optimal .....	42

## BAB V

### PENUTUP

5.1 Kesimpulan .....	45
5.2 Saran.....	45

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN



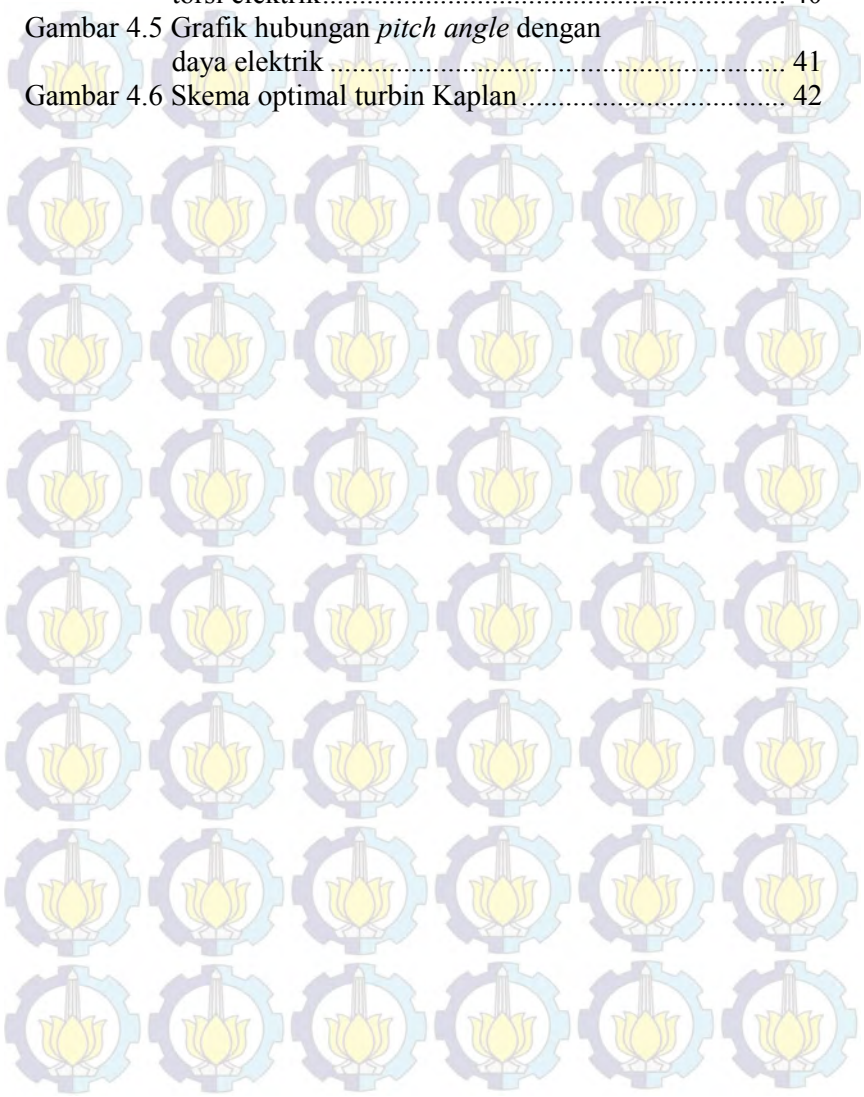
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Siklus PLTU .....	5
Gambar 2.2 <i>Air cooled condensor</i> .....	6
Gambar 2.3 Skema <i>discharge channel</i> PLTU .....	7
Gambar 2.4 Ilustrasi <i>discharge channel</i> PLTU .....	8
Gambar 2.5 Skema PLTA .....	9
Gambar 2.6 Turbin Pelton dan turbin <i>crossflow</i> .....	10
Gambar 2.7 Turbin Francis dan turbin Kaplan .....	10
Gambar 2.8 Grafik pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit aliran .....	13
Gambar 2.9 <i>Gearbox</i> .....	15
Gambar 2.10 Prinsip kerja generator .....	17
Gambar 2.11 Konstruksi generator .....	17
Gambar 2.12 Skema generator induksi .....	18
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	21
Gambar 3.2 Ilustrasi <i>discharge channel</i> PLTU .....	22
Gambar 3.3 Diagram blok sistem PLTA .....	23
Gambar 3.4 Pemodelan keseluruhan sistem .....	24
Gambar 3.5 Pemodelan subsistem turbin air .....	25
Gambar 3.6 Pemodelan subsistem <i>gearbox</i> .....	25
Gambar 3.7 Pemodelan subsistem generator induksi .....	26
Gambar 3.8 Pemilihan jenis turbin berdasarkan Q dan H .....	27
Gambar 3.9 Ilustrasi turbin Kaplan dan bagiannya .....	28
Gambar 3.10 Bagian propeller turbin Kaplan .....	28
Gambar 3.11 Blok user <i>defined function</i> Simulink .....	31
Gambar 3.12 Vektor kecepatan, dimensi, dan <i>pitch angle</i> propeller turbin Kaplan .....	32
Gambar 4.1 Grafik hubungan <i>pitch angle</i> dengan torsi dan daya mekanik turbin .....	37
Gambar 4.2 Grafik hubungan <i>pitch angle</i> dengan efisiensi turbin .....	38
Gambar 4.3 Grafik hubungan <i>pitch angle</i> dengan kecepatan putaran rotor generator .....	39

Gambar 4.4 Grafik hubungan *pitch angle* dengan torsi elektrik..... 40

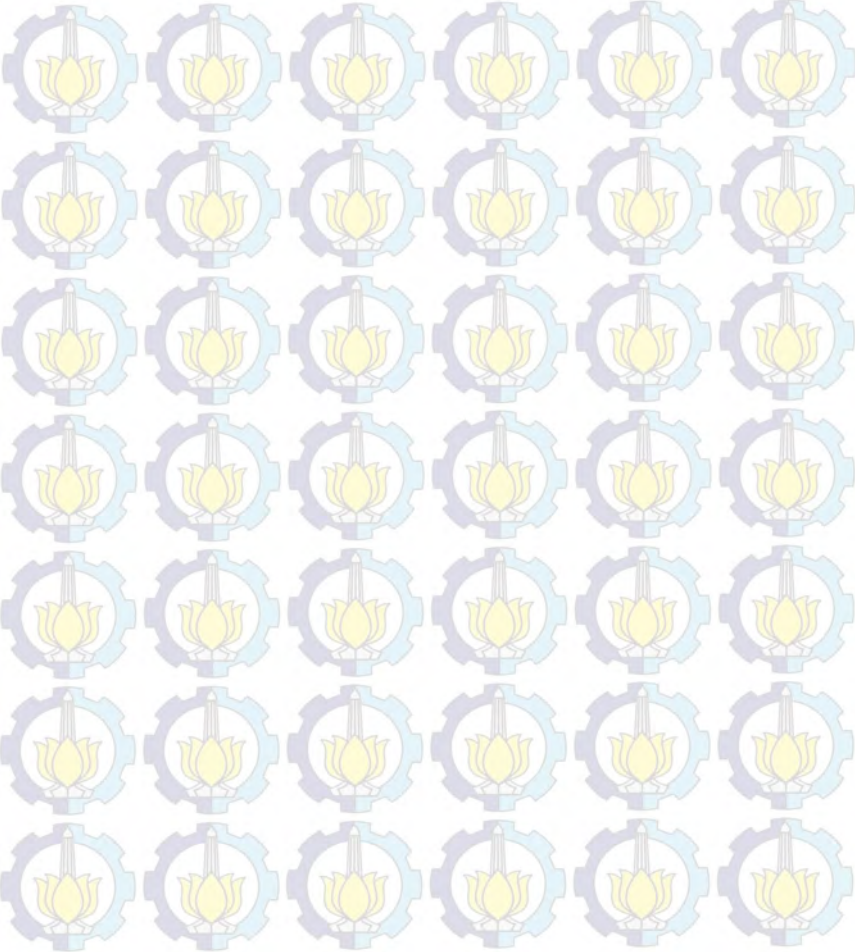
Gambar 4.5 Grafik hubungan *pitch angle* dengan daya elektrik ..... 41

Gambar 4.6 Skema optimal turbin Kaplan ..... 42



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penentuan Nilai Koefisien $c$ .....	14
Tabel 2.2 Penentuan Jumlah Bilah <i>Runner</i> Turbin ( $Z$ ) .....	15





*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## DAFTAR NOTASI

$\phi$	=	rasio kecepatan
$V_{linier}$	=	kecepatan keliling linier turbin (m/s)
$g$	=	percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
$H$	=	tinggi jatuh air netto/efektif (m)
$N$	=	kecepatan putaran turbin (rpm)
$N_U$	=	kecepatan satuan
$Q$	=	debit air yang mengenai turbin ( $m^3/s$ )
$C_d$	=	koefisien debit
$Q_U$	=	debit satuan
$\eta$	=	efisiensi turbin
$\rho$	=	densitas air ( $kg/m^3$ )
$P$	=	daya mekanik turbin (W)
$P_U$	=	daya satuan
$P_{air}$	=	daya aliran air (W)
$D$	=	diameter turbin (m)
$D_S$	=	diameter spesifik
$N_S$	=	kecepatan spesifik
$\tau$	=	torsi turbin/torsi propeller (Nm)
$\omega$	=	kecepatan putaran turbin (rad/s)
$c$	=	koefisien <i>runner</i> turbin Kaplan
$Z$	=	jumlah bilah <i>runner</i> turbin
$\omega_g$	=	kecepatan putaran rotor generator (rad/s)
$t$	=	waktu (s)
$T_e$	=	torsi elektrik (Nm)
$n$	=	<i>gear ratio</i>
$\omega_s$	=	<i>synchronous speed</i> (rad/s)
$\varphi_{sd}$	=	fluks magnetik stator sumbu d (Wb)
$\varphi_{sq}$	=	fluks magnetik stator sumbu q (Wb)
$\varphi_{rd}$	=	fluks magnetik rotor sumbu d (Wb)
$\varphi_{rq}$	=	fluks magnetik rotor sumbu q (Wb)
$X_s$	=	reaktansi stator ( $\Omega$ )
$X_r$	=	reaktansi rotor ( $\Omega$ )

$X_m$	=	reaktansi magnetisasi ( $\Omega$ )
$I_{sd}$	=	arus stator sumbu d (A)
$I_{sq}$	=	arus stator sumbu q (A)
$I_{rd}$	=	arus rotor sumbu d (A)
$I_{rq}$	=	arus rotor sumbu q (A)
$V_{sd}$	=	tegangan stator sumbu d (V)
$V_{sq}$	=	tegangan stator sumbu q (V)
$R_s$	=	resistansi stator ( $\Omega$ )
$R_r$	=	resistansi rotor ( $\Omega$ )
$s$	=	slip rotor
$P_e$	=	daya elektrik (W)
$r$	=	jari – jari propeller (m)
$V_t$	=	kecepatan tangensial turbin (m/s)
$\beta$	=	pitch angle ( $^\circ$ )
$V_y$	=	$V_t$ sesuai arah datangnya air (m/s)
$V_{air}$	=	kecepatan air (m/s)
$V_{rel}$	=	selisih $V_{air}$ dan $V_y$ (m/s)
$F_{a/p}$	=	gaya yang diberikan air pada propeller (N)
$m$	=	massa air yang mengenai propeller (kg)
$Vol$	=	volume air yang mengenai propeller ( $m^3$ )
$h$	=	tinggi propeller (m)
$d$	=	lebar propeller (m)
$f_e$	=	frekuensi elektrik tegangan stator (Hz)
$p$	=	jumlah pasangan pole generator
$Z_1$	=	jumlah <i>teeth</i> gear input
$Z_2$	=	jumlah <i>teeth</i> gear output
$N_1$	=	kecepatan putaran gear input
$N_2$	=	kecepatan putaran gear output

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memainkan peran penting untuk memenuhi kebutuhan listrik suatu daerah. Pada PLTU terdapat banyak proses kompleks yang dioperasikan oleh peralatan - peralatan seperti boiler, kondensor, turbin, generator, dan pompa. Salah satu bagian yang menjadi perhatian adalah kondensor. Kondensor merupakan alat penukar panas berisikan air pendingin yang digunakan untuk mendinginkan uap bekas keluaran turbin. Uap tersebut akan terkondensasi menjadi air kondensat. Air kondensat ini kemudian diumpankan kembali ke dalam boiler menggunakan sebuah pompa (Syamsurijal, 2009). Jadi, siklus dalam PLTU adalah siklus tertutup atau siklus yang tidak memerlukan air tambahan selama kondisinya mencukupi.

Saat beroperasi, kondensor membutuhkan air sebagai media pendingin uap melalui skema pertukaran panas. Setelah mendinginkan uap tersebut, air akan dibuang melalui saluran yang dinamakan *discharge channel*. Sampai sekarang belum ada inisiatif untuk memanfaatkan air keluaran *discharge channel* ini padahal potensi energi yang dimiliki sangat besar. Kondisi di lapangan menunjukkan bahwa debit dan ketinggian air keluaran *discharge channel* tersebut adalah sekitar  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan ketinggian 4 m. Kondisi ini memungkinkan air keluaran *discharge channel* dimanfaatkan sebagai sebuah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) mengingat debit yang deras dan ketinggian yang cukup telah dimiliki. Dalam tugas akhir ini dilakukan sebuah penelitian yang membahas mengenai potensi air keluaran *discharge channel* dalam sebuah perancangan sistem PLTA beserta pemodelan matematis komponen yang terkait didalamnya.

Sebagaimana diketahui bersama, salah satu komponen dalam sistem PLTA adalah turbin air. Turbin air terdiri dari beberapa jenis. Penentuan jenis turbin air dalam perancangan sistem PLTA



didasarkan pada karakteristik aliran air, yaitu debit aliran dan tinggi jatuh aliran. Salah satu jenis turbin air adalah turbin Kaplan. Pada turbin Kaplan terdapat istilah yang disebut *pitch angle* yang merupakan sudut antara bagian propeller dengan *hub*. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menguji performa turbin jenis ini pada *pitch angle*  $15^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ , dan  $55^{\circ}$  sehingga dijadikan acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini (Susanto, A., 2013).

## 1.2 Perumusan masalah

Dari paparan latar belakang di atas, maka permasalahan yang muncul antara lain:

- a. Bagaimana pengaruh perubahan *pitch angle* terhadap torsi, daya, dan efisiensi turbin pada sistem PLTA?
- b. Bagaimana pengaruh perubahan *pitch angle* terhadap kecepatan putaran rotor generator, torsi elektrik, dan daya elektrik pada sistem PLTA?
- c. Bagaimana skema turbin optimal pada sistem PLTA tersebut?

## 1.3 Batasan masalah

Adapun batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini antara lain:

- a. Air keluaran *discharge channel* dianggap air biasa dengan densitas  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- b. Penelitian hanya berfokus pada komponen turbin, *gearbox*, dan generator.
- c. Penelitian tidak ditekankan pada sambungan antar komponen sistem PLTA.
- d. Penelitian tidak ditekankan pada konstruksi sistem PLTA.
- e. Propeller turbin Kaplan diasumsikan berbentuk persegi sehingga lebar dan jari – jarinya sama.
- f. Pengaruh lebar *hub* pada turbin Kaplan diasumsikan sangat kecil.
- g. Arah datangnya air tegak lurus terhadap permukaan propeller.



- h. Debit air sebelum masuk dan setelah keluar bagian *wicket gate* pada turbin Kaplan tidak mengalami perubahan.
- i. Listrik keluaran generator dirubah menjadi listrik searah, lalu disambung ke inverter, dan dihubungkan dengan jala – jala.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian kali ini antara lain:

- a. Mengetahui pengaruh *pitch angle* terhadap torsi, daya, dan efisiensi turbin untuk sistem PLTA.
- b. Mengetahui pengaruh *pitch angle* terhadap kecepatan putaran rotor generator, torsi elektrik, dan daya elektrik untuk sistem PLTA.
- c. Mendapatkan skema turbin optimal untuk sistem PLTA yang dirancang.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

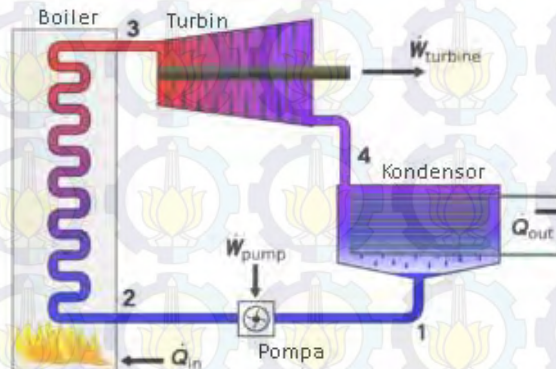
Manfaat dari penelitian dalam tugas akhir ini adalah untuk mengetahui seberapa besar torsi dan daya yang dikeluarkan oleh turbin dan generator sebagai bagian dari sistem PLTA untuk pemanfaatan air keluaran *discharge channel* pada PLTU berikut efisiensinya serta untuk mendapatkan skema turbin optimal berikut parameternya.



## BAB II TEORI PENUNJANG

### 2.1 Kondensor

Kondensor pada PLTU merupakan alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi untuk mendinginkan uap keluaran turbin menjadi air. Air hasil pendinginan uap tersebut dinamakan air kondensat. Kondensor merupakan awal dari sistem air kondensat yang menjadi sumber pasokan utama untuk air pengisi boiler pada PLTU. Jadi, siklus dalam PLTU merupakan siklus tertutup karena air hasil kondensasi uap keluaran turbin digunakan kembali pada proses pemanasan di boiler.



**Gambar 2.1** Siklus PLTU (Jumawa, C., 2013)

Dalam pengoperasiannya, kondensor membutuhkan media pendingin berupa fluida untuk mendinginkan uap keluaran turbin melalui skema *heat exchanger*. Skema ini memungkinkan panas dari uap keluaran turbin berpindah ke fluida pendingin sehingga temperatur uap keluaran turbin menurun dan terkondensasi menjadi air. Kondensor dibedakan menjadi beberapa jenis menurut media pendinginnya, antara lain (Niptro, R., et al., 2013):



a. *Air Cooled Condenser*

Kondensor yang menggunakan udara sebagai fluida pendinginnya. Kondensor jenis ini mengkondensasikan uap keluaran turbin dan kembali ke boiler tanpa kehilangan air.



**Gambar 2.2** *Air cooled condenser*

b. *Water Cooled Condenser*

Kondensor yang menggunakan cairan sebagai fluida pendinginnya. Beberapa jenis cairan yang digunakan sebagai media pendingin antara lain: air, freon, dan ammonia. Salah satu jenis *water cooled condenser* yang banyak digunakan pada PLTU adalah *shell and tube condenser*. Uap keluaran turbin masuk ke bagian *shell* sementara air pendingin melewati bagian *tube* dengan kecepatan cukup tinggi, yaitu 1,5 – 2 m/s. Air pendingin diambil dari sumber air di sekitar PLTU, misal: danau, sungai, dan laut.

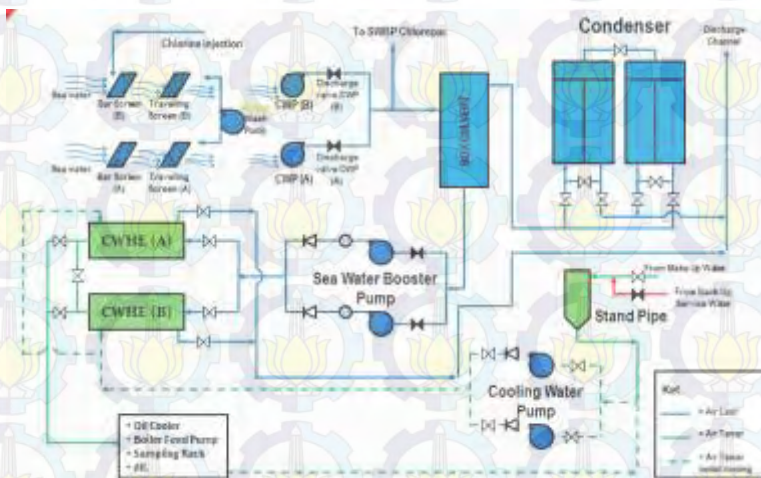
c. *Evaporative Condenser*

Kondensor yang menggunakan kombinasi udara dan air sebagai media pendinginnya.



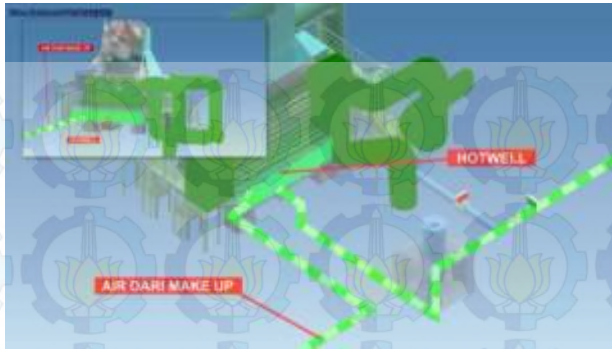
## 2.2 Discharge Channel

Air pendingin pada kondensor PLTU merupakan air laut yang telah mengalami beberapa proses, seperti: *bar screen*, *travelling screen*, *screen wash pump*, *cooling water pump* (CWP), kemudian ditampung di *box culvert*, lalu dialirkan sebagai media pendingin pada kondensor. Setelah memasuki kondensor, air tersebut akan keluar menuju saluran yang dinamakan *discharge channel*. Saluran ini berfungsi untuk membuang air pendingin kondensor menuju sungai. Jadi, air yang digunakan sebagai pendingin pada kondensor tidak diikuti dalam proses utama PLTU sebagaimana air kondensat melainkan hanya dilewatkan sebagai media penukar panas. Berikut adalah skema aliran air pada discharge channel PLTU.



**Gambar 2.3** Skema *discharge channel* PLTU (Farzi, A., 2015)

Terlihat pada Gambar 2.4, warna hijau tua merupakan saluran *discharge channel* yang representasinya lebih jelas dan menunjukkan perannya sebagai saluran pembuangan air pendingin uap keluaran turbin pada kondensor.



**Gambar 2.4** Ilustrasi *discharge channel* PLTU

### 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) merupakan sebuah sistem pembangkitan energi listrik dengan mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik oleh turbin dan diubah lagi menjadi energi listrik oleh generator dengan memanfaatkan ketinggian dan kecepatan aliran air (Hasbullah, 2009). Jenis PLTA dibagi berdasarkan beberapa golongan, antara lain (Patty, 1995):

- a. Jenis PLTA berdasarkan teknis:
  - PLTA yang menggunakan air sungai atau waduk
  - PLTA yang menggunakan air yang dipompa ke *reservoir* yang letaknya lebih tinggi
  - PLTA yang menggunakan pasang surut air laut
  - PLTA yang menggunakan energi ombak
- b. Jenis PLTA berdasarkan kapasitas:
  - PLTA mikro, dengan daya 0,5 – 100 kW
  - PLTA kapasitas rendah, dengan daya 100 – 1000 kW
  - PLTA kapasitas sedang, dengan daya 1 – 10 MW
  - PLTA kapasitas besar, dengan daya > 10 MW
- c. Jenis PLTA berdasarkan tinggi jatuhnya air (H):
  - PLTA tekanan rendah, dengan  $H < 15$  m
  - PLTA tekanan sedang, dengan  $15 \text{ m} < H < 50$  m
  - PLTA tekanan tinggi, dengan  $H > 50$  m

PLTA terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain:

a. Dam

Berfungsi untuk menampung air dalam jumlah besar karena turbin memerlukan pasokan air yang cukup dan stabil.

b. Turbin Air

Berfungsi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik. Air memukul sudu – sudu turbin sehingga turbin berputar.

c. Generator

Alat yang memanfaatkan putaran turbin untuk membangkitkan energi listrik. Generator dan turbin dihubungkan dengan komponen yang disebut *gearbox*.



**Gambar 2.5** Skema PLTA

## 2.4 Turbin Air

Turbin air merupakan bagian yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik berupa putaran. Bagian – bagian dari turbin antara lain:

a. Katup pemandu (*guide vane*)

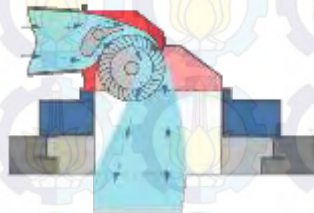


- b. Bagian yang berputar (*runner*)
- c. Kotak roda (*whell case*)
- d. Poros (*shaft*)
- e. Bantalan poros (*bearings*)

Turbin air dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan cara turbin bekerja mengubah energi yang dimiliki air menjadi putaran, yaitu turbin impuls dan turbin reaksi (Permatasari, R., 2008).

a. Turbin Impuls

Jenis turbin air yang bekerja dengan menyemprotkan air ke mangkuk turbin. Contoh turbin impuls adalah turbin Pelton dan turbin *crossflow*.



**Gambar 2.6** Turbin Pelton dan turbin *crossflow*  
([cinkhydro-energy.com](http://cinkhydro-energy.com))

b. Turbin Reaksi

Jenis turbin yang bekerja dengan kondisi baling – baling turbin berputar bersama air yang mengenai turbin lalu air mengalir ke bawah menuju saluran pembuang. Yang termasuk turbin reaksi adalah turbin Francis dan turbin Kaplan/propeller.



**Gambar 2.7** Turbin Francis dan turbin Kaplan



### 2.4.1 Karakteristik turbin air

Sebuah turbin air mempunyai karakteristik tertentu yang dinyatakan secara umum oleh 6 buah konstanta, antara lain (Luknanto, D., 2013):

a. Rasio Kecepatan ( $\phi$ )

Perbandingan kecepatan keliling linier turbin pada ujung diameter nominalnya dengan kecepatan teoritis air yang melalui curat bertinggi terjun sama dengan tinggi terjun yang bekerja pada turbin.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{V_{linier}}{\sqrt{2gH}} \\ &= \frac{\frac{N\pi D}{60}}{\sqrt{2gH}} \\ &= \frac{ND}{84,6\sqrt{H}}\end{aligned}\quad (2.1)$$

$N$  = kecepatan putaran turbin (rpm)

$D$  = diameter turbin (m)

$H$  = tinggi jatuh air efektif/head (m)

b. Kecepatan Satuan ( $N_U$ )

Kecepatan putar turbin dengan diameter dan tinggi terjun satu satuan panjang.

$$N = 84,6\phi \frac{\sqrt{H}}{D} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned}N_U &= 84,6\phi \\ &= \frac{ND}{\sqrt{H}}\end{aligned}\quad (2.3)$$

c. Debit Satuan ( $Q_U$ )

Debit yang masuk ke turbin dengan diameter dan tinggi terjun satu satuan panjang.

$$Q = C_d \frac{1}{4} \pi D^2 \sqrt{2gH} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned}Q_U &= C_d \frac{1}{4} \pi \sqrt{2g} \\ &= \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}\end{aligned}\quad (2.5)$$

$Q$  = debit air yang mengenai turbin ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C_d$  = koefisien debit

d. Daya Satuan ( $P_U$ )

Daya yang dibangkitkan turbin dengan diameter dan tinggi terjun satu satuan panjang.

$$P = \eta \rho Q g H$$

$$= \eta \rho g Q_U D^2 \sqrt{H} H \quad (2.6)$$

$$P_U = \eta \rho g Q_U$$

$$= \frac{P}{D^2 H^{3/2}} \quad (2.7)$$

$P$  = daya mekanik turbin (watt)

$\rho$  = densitas air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$\eta$  = efisiensi turbin

e. Diameter Spesifik ( $D_S$ )

Diameter turbin untuk menghasilkan satu satuan daya pada tinggi terjun satu satuan tinggi.

$$D = \frac{1}{\sqrt{P_U}} \frac{\sqrt{P}}{H^{3/4}} \quad (2.8)$$

$$D_S = \frac{1}{\sqrt{P_U}}$$

$$= \frac{DH^{3/4}}{\sqrt{P}} \quad (2.9)$$

f. Kecepatan Spesifik ( $N_S$ )

Kecepatan putar turbin yang menghasilkan satu satuan daya pada tinggi terjun satu satuan tinggi.

$$N = \sqrt{P_U} N_U \frac{H^{5/4}}{P} \quad (2.10)$$

$$N_S = \sqrt{P_U} N_U$$

$$= \frac{N \sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2.11)$$

Selain keenam konstanta di atas, terdapat pula karakteristik penting lain dalam turbin air, yaitu:

a. Torsi Turbin ( $\tau$ )

Energi yang dihasilkan turbin saat berputar akibat aliran air yang mengenainya. Torsi turbin air dapat diperoleh dengan penurunan dari persamaan matematis impuls dan momentum (Crawford, A., et all., 2011).

$$dF_{a/p} = \frac{dmV_{rel}}{dt} \quad (2.12)$$

b. Efisiensi Turbin ( $\eta$ )

Perbandingan antara daya mekanik yang dihasilkan turbin ( $P$ ) dengan daya aliran air yang mengenai turbin (Gustafsson, M., 2013).

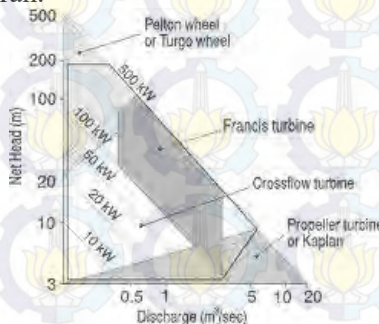
$$P = \tau\omega \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{P}{\rho Q g H} = \frac{\tau\omega}{\rho Q g H} \quad (2.14)$$

## 2.4.2 Pemilihan jenis turbin air

Terdapat beberapa parameter dalam menentukan jenis turbin air, antara lain (Patty, 1995):

- a. Tinggi jatuh air efektif (*head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin. Pada Gambar 2.8 terlihat grafik pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit aliran.



**Gambar 2.8** Grafik pemilihan jenis turbin berdasarkan head dan debit aliran



Dapat diperoleh informasi bahwa turbin Pelton cocok untuk *head* tinggi dan debit aliran rendah sementara turbin Kaplan efektif untuk *head* rendah dan debit aliran deras. Turbin Francis dan turbin *crossflow* untuk *head* dan debit aliran rendah – menengah.

b. Kecepatan Spesifik Turbin

Berikut nilai kisaran kecepatan spesifik turbin air untuk setiap jenisnya.

- $N_S = 9 - 25$  (turbin Pelton 1 pancaran)
- $N_S = 25 - 60$  (turbin Pelton lebih dari 1 pancaran)
- $N_S = 40 - 400$  (turbin Francis)
- $N_S = 260 - 860$  (turbin Kaplan)

Untuk turbin Kaplan,  $N_S$  dapat dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan (Moody, 1943).

$$N_S = \frac{9431}{H+9,75} + 155 \quad (2.15)$$

### 2.4.3 Dimensi turbin

Dimensi turbin dapat ditentukan dengan metode yang dikemukakan oleh F. De Siervo dan F. De Leva yang dirumuskan lewat persamaan berikut.

$$D = cQ^{0,5} \quad (2.16)$$

Nilai koefisien  $c$  diperoleh dari Tabel 2.1 berdasarkan *head*.

**Tabel 2.1** Penentuan Nilai Koefisien  $c$  (Akbar, I. I., 2003)

H (m)	5	10	15	20	25
C	0,39	0,37	0,37	0,36	0,36

Selain diameter turbin ( $D$ ), juga dapat ditentukan jumlah bilah *runner* turbin ( $Z$ ) berdasarkan nilai  $N_S$ .

**Tabel 2.2** Penentuan Jumlah Bilah *Runner* Turbin (Z)

Ns (Hp)	400	500	600	700	800
Ns (kW) = 0,857Ns	340	430	510	600	680
Z	8-6	7-6	6-5	5-4	4

## 2.5 Gearbox

*Gearbox* adalah bagian penghubung antara turbin dan generator. *Gearbox* merupakan salah satu komponen utama dalam sistem *drive train*. Sistem *drive train* ini mencakup bagian pengatur *pitch angle* (sudut antara *hub* dan propeller pada turbin), *hub*, poros rotor, *gearbox*, dan generator (Martinez, J., 2007).

**Gambar 2.9** *Gearbox* ([anaheimautomation.com](http://anaheimautomation.com))

Dalam *gearbox* terdapat istilah *gear ratio*. *Gear ratio* adalah perbandingan antara jumlah putaran yang dihasilkan gear output (*driving gear*) terhadap jumlah putaran gear input (*drive gear*) yang berbeda ukuran. Jika diketahui *gear ratio* dan kecepatan putaran gear input, maka dapat diketahui kecepatan putaran gear output.

$$N_1 Z_1 = N_2 Z_2 \quad (2.17)$$

$$N_1 \frac{Z_1}{Z_2} = N_2 \quad (2.18)$$

$$N_1 n = N_2 \quad (2.19)$$

$Z_1$  = jumlah *teeth* gear input

$Z_2$  = jumlah *teeth* gear output

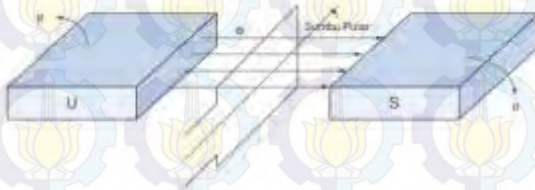
$N_1$  = kecepatan putaran gear input

$N_2$  = kecepatan putaran gear output

$n$  = gear ratio

## 2.6 Generator

Generator merupakan komponen sistem PLTA yang berfungsi mengubah energi mekanik dari putaran turbin menjadi energi listrik. Generator bekerja berdasarkan Hukum Faraday, yaitu jika pada sekeliling penghantar terjadi perubahan medan magnet, maka pada penghantar tersebut akan dibangkitkan suatu gaya gerak listrik (GGL) yang sifatnya berlawanan dengan perubahan medan magnet tersebut.



**Gambar 2.10** Prinsip kerja generator (Girsang, L. J., 2010)

Generator terdiri dari 2 bagian utama, yaitu:

a. Stator

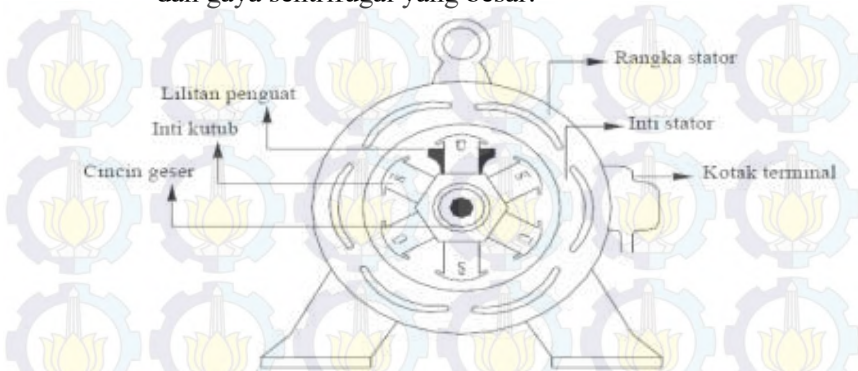
Stator merupakan bagian generator yang diam. Di dalam stator terdapat inti stator untuk menempatkan konduktor dan mengatur arah medan magnet, belitan stator yang terdiri dari batang konduktor di dalam slot dan ujung kumpuran, alur stator yang merupakan tempat meletakkan belitan stator, serta rumah stator.

b. Rotor

Rotor merupakan bagian generator yang bergerak. Rotor terdiri atas bagian inti kutub, tempat poros dan inti rotor yang berfungsi sebagai jalur fluks magnet yang dibangkitkan kumpuran medan. Rotor juga mempunyai bagian yang dinamakan kumpuran medan, tempat bagian penghantar untuk jalur arus pemacuan dan bagian yang



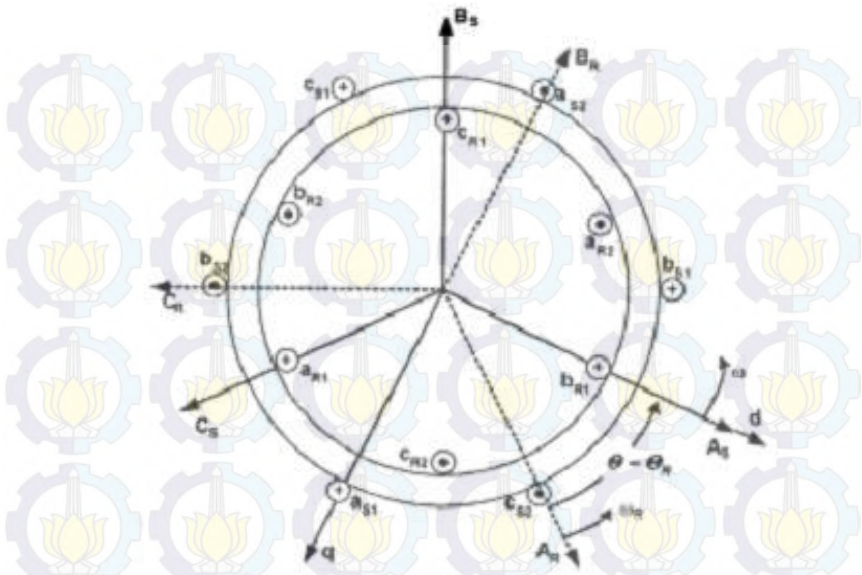
diisolasi untuk menjaga ketahanan rotor dari suhu tinggi dan gaya sentrifugal yang besar.



**Gambar 2.11** Konstruksi generator (Girsang, L. J., 2010)

## 2.7 Generator Induksi

Generator induksi atau nama lainnya generator asinkron merupakan jenis generator AC (Chapman, S. J., 2005). Pada Gambar 2.12 terlihat bahwa generator induksi mempunyai *stator winding*/lilitan stator ( $A_s$ ,  $B_s$ ,  $C_s$ ) dan *rotor winding*/lilitan rotor ( $A_r$ ,  $B_r$ ,  $C_r$ ). Jika lilitan stator diberikan arus listrik, maka akan muncul medan magnet yang berputar. Kecepatan putaran medan magnet ini disebut *synchronous speed* ( $\omega_s$ ). Jika terdapat gaya luar yang menggerakkan rotor sehingga berputar melebihi *synchronous speed*, maka alat akan berfungsi sebagai generator yang menghasilkan listrik. Listrik yang dihasilkan adalah listrik bolak – balik. Gaya luar yang menggerakkan rotor sehingga berputar ini salah satunya dapat berasal dari putaran turbin.



**Gambar 2.12** Skema generator induksi

### 2.7.1 Sumbu acuan d – q

Sumbu acuan d – q merupakan sebuah pemisalan acuan pada pemodelan generator induksi untuk memudahkan pencarian solusi persamaan yang rumit dengan koefisien bergantung waktu. Transformasi Park membagi variabel pada stator dan rotor berdasarkan sumbu acuan d – q (Slemon, G., 1989). Sumbu d sejajar dengan sumbu medan magnetik lilitan sementara sumbu q mengarah  $90^\circ$  dari sumbu d.

### 2.7.2 Persamaan pada generator induksi

Terdapat 2 model dalam persamaan generator induksi, yaitu model detail yang mencakup kondisi transien dalam rotor dan stator dan model sederhana yang hanya mencakup kondisi transien pada rotor. Model yang lebih umum adalah model yang kedua (Martins, et al., 2007). Beberapa persamaan yang digunakan antara lain sebagai berikut.

a. Fluks Magnetik ( $\varphi$ )

$$\varphi_{sd} = X_s I_{sd} + X_m I_{rd} \quad (2.20a)$$

$$\varphi_{sq} = X_s I_{sq} + X_m I_{rq} \quad (2.20b)$$

$$\varphi_{rd} = X_r I_{rd} + X_m I_{sd} \quad (2.20c)$$

$$\varphi_{rq} = X_r I_{rq} + X_m I_{sq} \quad (2.20d)$$

$\varphi_{sd}$  = fluks magnetik stator sumbu d

$\varphi_{sq}$  = fluks magnetik stator sumbu q

$\varphi_{rd}$  = fluks magnetik rotor sumbu d

$\varphi_{rq}$  = fluks magnetik rotor sumbu q

$X_s$  = reaktansi stator

$X_r$  = reaktansi rotor

$X_m$  = reaktansi magnetisasi

$I_{sd}$  = arus stator sumbu d

$I_{sq}$  = arus stator sumbu q

$I_{rd}$  = arus rotor sumbu d

$I_{rq}$  = arus rotor sumbu q

b. Tegangan (V)

$$V_{sd} = -R_s I_{sd} + \omega_s \varphi_{sq} - \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (2.21a)$$

$$V_{sq} = -R_s I_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} - \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (2.21b)$$

$$0 = -R_r I_{rd} + s\omega_s \varphi_{rq} - \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (2.21c)$$

$$0 = -R_r I_{rq} - s\omega_s \varphi_{rd} - \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (2.21d)$$

$V_{sd}$  = tegangan stator sumbu d

$V_{sq}$  = tegangan stator sumbu q

$R_s$  = resistansi stator

$R_r$  = resistansi rotor

c. Synchronous Speed ( $\omega_s$ )

*Synchronous speed* adalah kecepatan putaran medan magnet yang muncul akibat lilitan stator diberi arus listrik (Fletcher, J., et, all.).



$$\omega_s = \frac{60f_e}{p} \text{ rpm} \quad (2.22)$$

$f_e$  = frekuensi elektrik tegangan stator (Hz)

$p$  = jumlah pasangan pole generator

d. Slip Rotor ( $s$ )

Slip rotor bernilai (+) jika alat berfungsi sebagai motor dan bernilai (-) jika alat berfungsi sebagai generator.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s} \quad (2.23)$$

e. Torsi Elektrik ( $T_e$ )

Torsi elektrik bernilai (+) jika alat berfungsi sebagai motor dan bernilai (-) jika alat berfungsi sebagai generator.

$$T_e = \varphi_{rq} I_{rd} - \varphi_{rd} I_{rq} \quad (2.24)$$

f. Daya Elektrik ( $P_e$ )

Daya elektrik dapat dicari dengan perkalian torsi elektrik dengan kecepatan putaran rotor generator (dalam satuan rpm) dengan koefisien tertentu bergantung satuan yang dipakai (*engineeringtoolbox.com*).

Untuk  $P_e$  dalam watt dan  $T_e$  dalam Nm,

$$P_e = \frac{T_e \omega_g}{9,554} \quad (2.25)$$

Untuk  $P_e$  dalam horsepower (hp) dan  $T_e$  dalam in lbf,

$$P_e = \frac{T_e \omega_g}{63025} \quad (2.26)$$

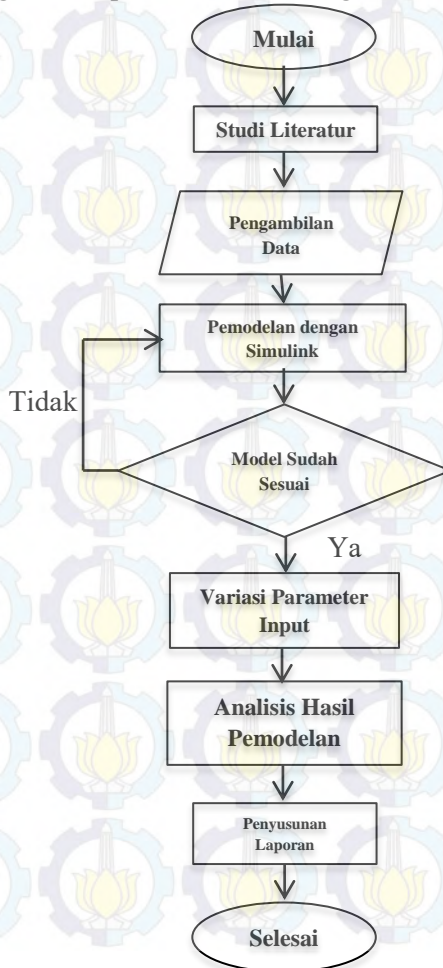
Untuk  $P_e$  dalam watt dan  $T_e$  dalam ft lbf,

$$P_e = \frac{T_e \omega_g}{5252} \quad (2.27)$$

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian terkait tugas akhir ini.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.2 Studi Literatur

Literatur yang menjadi acuan atau referensi dalam penulisan tugas akhir ini adalah literatur terkait perancangan PLTA, mulai dari pemilihan jenis turbin, persamaan matematis yang digunakan, *gearbox*, hingga generator. Selain literatur terkait perancangan PLTA, juga digunakan literatur mengenai pemodelan matematis sistem elektrik khususnya generator dan literatur mengenai Simulink MATLAB.

### 3.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan di PT. PJB UP Paiton pada bulan Oktober 2015. Pengambilan data dilakukan dengan melihat kondisi lapangan secara langsung serta wawancara dengan pihak PT. PJB UP Paiton.



**Gambar 3.2** Ilustrasi *discharge channel* PLTU

Gambar 3.2 menunjukkan kondisi lapangan dan lingkaran kuning menunjukkan air keluaran *discharge channel* PLTU yang akan



dimanfaatkan menjadi sistem PLTA. Data teknis yang diperoleh adalah sebagai berikut.

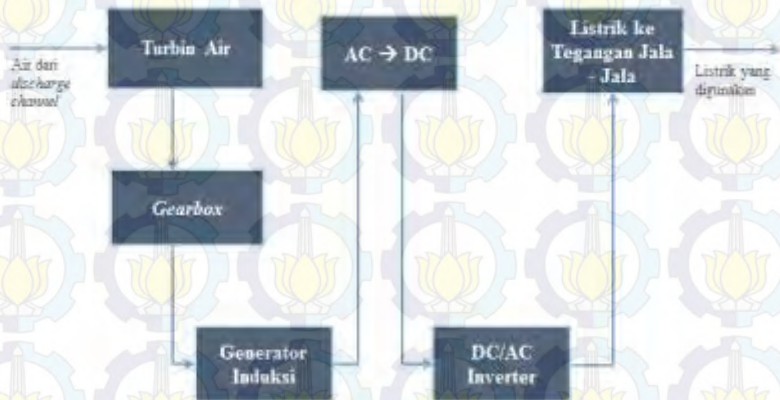
Debit air ( $Q$ ) =  $27.360 \text{ m}^3/\text{jam} = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Tinggi jatuh air/head ( $H$ ) = 4 m

Debit air diukur berdasarkan informasi pada pompa yang terletak dekat *discharge channel*. Sementara head yang bernilai 4 meter menandakan bahwa komponen sistem PLTA yang mengkonversi energi air menjadi energi mekanik, yaitu turbin harus diletakkan 4 meter di bawah titik jatuhnya air saluran *discharge channel* setelah melewati proses pertukaran panas pada kondensor.

Dikarenakan belum adanya instalasi sistem ini, maka saluran *discharge channel* yang terdapat di PLTU harus mengalami modifikasi agar penempatan komponen sistem PLTA dapat dilakukan dengan baik.

### 3.4 Diagram Blok Sistem

Berikut adalah diagram blok pemodelan sistem PLTA ini.



**Gambar 3.3** Diagram blok sistem PLTA

Air keluaran *discharge channel* akan menabrak turbin air sehingga turbin berputar. Putaran turbin dihubungkan ke rotor

generator melalui *gearbox*. Putaran pada rotor generator membuat generator menghasilkan listrik bolak – balik. Listrik bolak – balik pada generator disearahkan menjadi listrik searah karena reservoir energi pada sistem PLTA ini tidak menentu. Oleh karena kebutuhan listrik yang siap digunakan adalah listrik bolak – balik, maka listrik yang telah disearahkan tadi diubah kembali menjadi listrik bolak – balik oleh DC/AC Inverter sebelum dihubungkan ke tegangan jala – jala.

Seperti yang telah disebutkan dalam batasan masalah, penelitian ini hanya ditekankan pada komponen turbin, *gearbox*, dan generator. Sementara pembahasan komponen setelah generator merupakan rekomendasi yang dapat diberikan dengan alasan yang telah disebutkan di atas. Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan sistem.



**Gambar 3.4** Pemodelan keseluruhan sistem

Sistem terdiri dari 3 subsistem utama, yaitu turbin air, gearbox, dan generator induksi.

Input sistem:

- debit air ( $Q$ ), dalam satuan  $m^3/s$
- *pitch angle* ( $\beta$ ), dalam satuan derajat
- diameter turbin ( $D$ ), dalam satuan meter
- *gear ratio* ( $n$ )

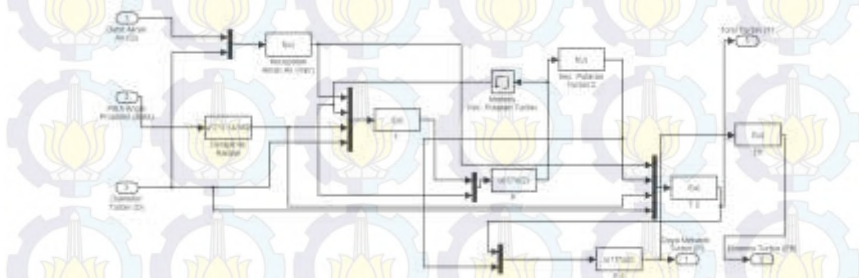
Output sistem:

- torsi turbin ( $\tau$ ), dalam satuan Nm
- daya mekanik turbin ( $P$ ), dalam satuan watt

- efisiensi turbin (%)
- kecepatan putaran rotor generator ( $\omega_g$ ), dalam satuan rad/s
- torsi elektrik ( $T_e$ ), dalam satuan Nm
- daya elektrik ( $P_e$ ), dalam satuan watt

### 3.4.1 Blok subsistem turbin air

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan subsistem turbin air.



**Gambar 3.5** Pemodelan subsistem turbin air

Input:

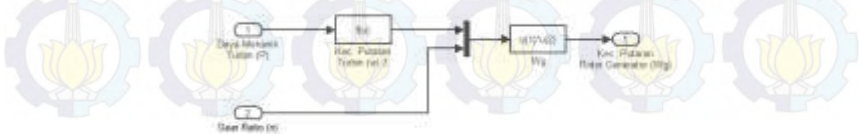
- debit air ( $Q$ ), dalam satuan  $m^3/s$
- *pitch angle* ( $\beta$ ), dalam satuan derajat
- diameter turbin ( $D$ ), dalam satuan meter

Output:

- torsi turbin ( $\tau$ ), dalam satuan Nm
- daya mekanik turbin ( $P$ ), dalam satuan watt
- efisiensi turbin (%)

### 3.4.2 Blok subsistem gearbox

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan subsistem gearbox.



**Gambar 3.6** Pemodelan subsistem gearbox



Input:

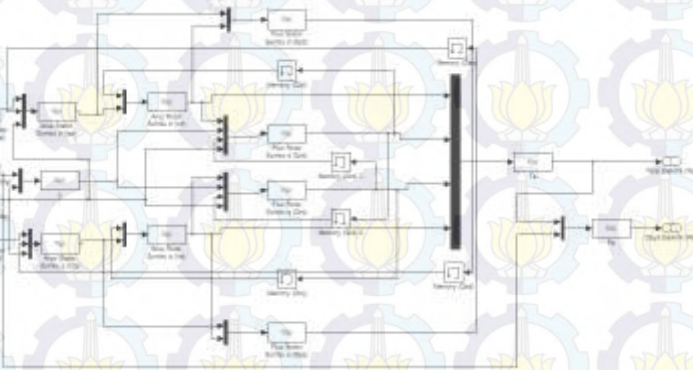
- daya mekanik turbin ( $P$ ), dalam satuan watt
- *gear ratio* ( $n$ )

Output:

- kecepatan putaran rotor generator ( $\omega_g$ ), dalam satuan rad/s

### 3.4.3 Blok subsistem generator induksi

Berikut adalah ilustrasi singkat pemodelan subsistem generator induksi.



**Gambar 3.7** Pemodelan subsistem generator induksi

Input:

- kecepatan putaran rotor generator ( $\omega_g$ ), dalam satuan rad/s
- *synchronous speed* ( $\omega_s$ ), dalam satuan rad/s
- tegangan stator sumbu d ( $V_{sd}$ ), dalam satuan volt
- tegangan stator sumbu q ( $V_{sq}$ ), dalam satuan volt

Output:

- torsi elektrik ( $T_e$ ), dalam satuan Nm
- daya elektrik ( $P_e$ ), dalam satuan watt

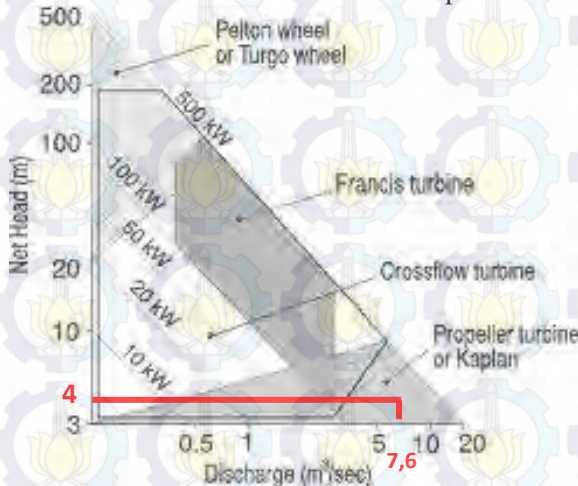
### 3.5 Penentuan Parameter untuk Pemodelan

Simulink merupakan salah satu *tools* pada *software* MATLAB yang memungkinkan pengguna untuk melakukan pemodelan sistem, mulai dari yang sederhana hingga yang

kompleks. Sebelum melakukan pemodelan dengan Simulink, dilakukan tahapan - tahapan untuk menentukan parameternya.

### 3.5.1 Penentuan jenis turbin

Jenis turbin yang digunakan untuk perancangan sistem PLTA ditentukan berdasarkan kurva pemilihan turbin air pada Gambar 2.8 dan Persamaan 2.15 untuk mendapatkan nilai  $N_s$ .



**Gambar 3.8** Pemilihan jenis turbin berdasarkan  $Q$  dan  $H$

Dari Gambar 3.4 didapatkan bahwa jenis turbin air yang cocok untuk kondisi lapangan adalah turbin Kaplan atau propeller karena debit air yang digunakan untuk menggerakkan turbin cukup deras dan head tidak terlalu tinggi.

Penentuan nilai kecepatan spesifik ( $N_s$ ) menggunakan Persamaan 2.15.

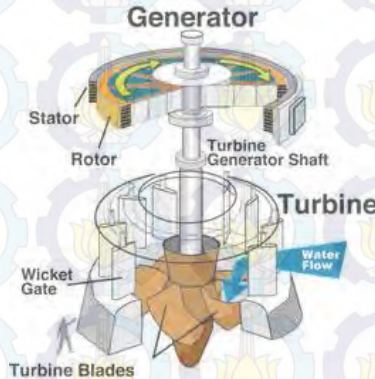
$$N_s = \frac{9431}{H+9,75} + 155 \quad (3.1)$$

dengan memasukkan nilai  $H = 4$ , diperoleh:

$$N_s = \frac{9431}{4+9,75} + 155$$

$$= 840,89 \quad (3.2)$$

Nilai  $N_S$  tersebut sesuai dengan nilai  $N_S$  untuk turbin Kaplan yang berada pada kisaran 260 – 860.



**Gambar 3.9** Ilustrasi turbin Kaplan dan bagiannya

Turbin Kaplan mempunyai beberapa bagian, antara lain: *blade/propeller* dan *wicket gate*.

### 3.5.2 Penentuan dimensi turbin

Dimensi turbin Kaplan yang ditentukan disini dibatasi hanya pada diameter propeller dan jumlah propellernya. Sementara untuk *wicket gate* yang merupakan bagian pengarah aliran air, dimensinya ditetapkan berdasarkan penelitian terdahulu (Susanto, A., 2013).

Sudut bukaan *wicket gate* =  $30^\circ$

Selain itu, juga diasumsikan debit air sebelum masuk *wicket gate* dan setelah keluar *wicket gate* adalah sama sehingga analisis ditekankan pada dimensi propeller.

Diameter propeller (D) ditentukan berdasarkan Persamaan 2.16 yaitu:



$$D = cQ^{0,5} \quad (3.3)$$

Nilai  $c$  ditentukan berdasarkan Tabel 2.1, diperoleh:  
 $c = 0,39$  untuk nilai  $H$  di kisaran 5 m

Dengan memasukkan nilai  $Q = 7,6 \text{ m}^3/\text{s}$  maka didapat:

$$\begin{aligned} D &= 0,39 \cdot (7,6)^{0,5} \\ &= 1,08 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Jumlah propeller ( $Z$ ) ditentukan lewat Tabel 2.2 berdasarkan nilai  $N_s$  yang telah diperoleh.

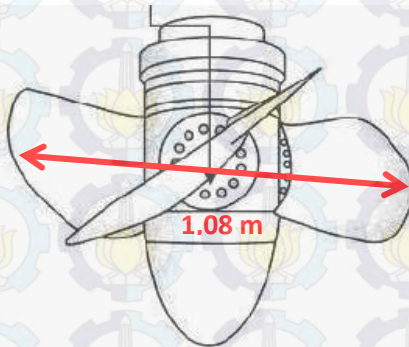
$Z = 4$  untuk nilai  $N_s$  di kisaran 800.

Alhasil, turbin Kaplan yang digunakan mempunyai spesifikasi awal sebagai berikut:

Diameter ( $D$ ) = 1,08 m,

Jumlah propeller ( $Z$ ) = 4 buah,

Sudut bukaan *wicket gate* =  $30^\circ$ .



**Gambar 3.10** Bagian propeller turbin Kaplan

### 3.5.3 Penentuan parameter *gearbox*

Parameter *gearbox* diperlukan sebagai koefisien dalam menkonversikan keluaran turbin menuju generator. Dalam

penelitian ini, parameter yang digunakan dalam gearbox adalah gear ratio ( $n$ ). Gear ratio ini akan dijadikan salah satu parameter input dan divariasikan. Gear ratio yang sesuai untuk turbin Kaplan berkisar antara 1 : 3 hingga 1 : 7 (<http://directindustry.com>). Ditentukan nilai input  $n$  pada pemodelan dengan:

$$n_1 = 5$$

$$n_2 = 6$$

$$n_3 = 7$$

### 3.5.4 Penentuan parameter generator

Parameter generator merupakan sejumlah koefisien sebagai satu set kombinasi nilai yang menjadi spesifikasi generator induksi (Scutaru, G., et al.).

$$X_s \text{ (reaktansi stator)} = 11,62 \, \Omega$$

$$X_r \text{ (reaktansi rotor)} = 6,28 \, \Omega$$

$$X_m \text{ (reaktansi magnetisasi)} = 142 \, \Omega$$

$$R_s \text{ (resistansi stator)} = 7,78 \, \Omega$$

$$R_r \text{ (resistansi rotor)} = 7,1 \, \Omega$$

$$p \text{ (jumlah pasangan pole)} = 2 \text{ (generator mempunyai 4 pole)}$$

$$f_e \text{ (frekuensi elektrik tegangan stator)} = 50 \text{ Hz}$$

Generator induksi membutuhkan masukan tegangan pada stator. Tegangan stator diberikan pada sumbu acuan d – q berdasarkan Sub Subbab 2.7.2.

$$V_{sd} \text{ (tegangan stator sumbu d)} = 220 \text{ V}$$

$$V_{sq} \text{ (tegangan stator sumbu q)} = 220 \text{ V}$$

Salah satu parameter yang paling penting dalam generator induksi adalah *synchronous speed* ( $\omega_s$ ) atau kecepatan putaran medan magnet. Nilai  $\omega_s$  dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 2.22.

$$\omega_s = \frac{60f_e}{p} \quad (3.5)$$

Nilai  $f_e$  dimasukkan 50 Hz dan p dimasukkan 2.

$$\begin{aligned}\omega_s &= \frac{60.50}{2} \\ &= 1500 \text{ rpm}\end{aligned}\quad (3.6)$$

Nilai  $\omega_s$  harus berada dalam satuan rad/s untuk menyinkronkan dengan pemodelan, sehingga:

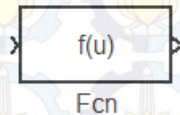
$$\begin{aligned}\omega_s &= \frac{1500.2\pi}{60} \\ &= 157 \text{ rad/s}\end{aligned}\quad (3.7)$$

Parameter – parameter di atas ditetapkan berdasarkan asumsi sebagai berikut (Martinez, J., 2007):

- Histeresis magnetik dan efek saturasi diabaikan
- Lilitan stator dan rotor dianggap simetris
- Kapasitansi lilitan diabaikan
- Posisi rotor dan stator tidak menyebabkan variasi induksi terhadap sesamanya.
- Arus stator bernilai positif saat mengalir dalam jaringan.
- Daya yang dihasilkan bernilai positif saat disambungkan ke jaringan listrik.
- Lilitan stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara selama beroperasi.

### 3.6 Pemodelan Torsi Propeller

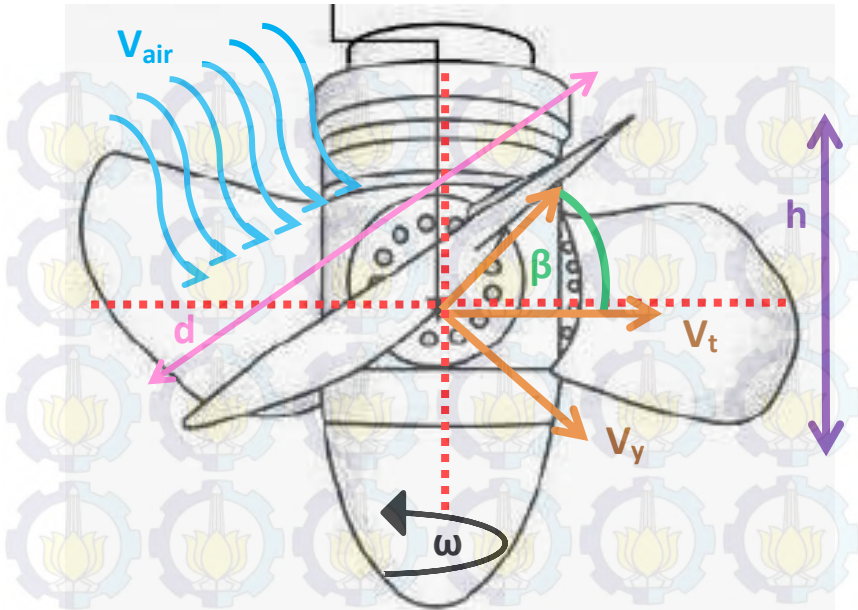
Pemodelan dengan Simulink dilakukan dengan memasukkan persamaan atau model matematis yang telah ditentukan ke dalam blok *user defined function* pada *library* Simulink.



**Gambar 3.11** Blok *user defined function* Simulink

Salah satu persamaan yang penting dalam perancangan sistem PLTA adalah torsi keluaran turbin.





**Gambar 3.12** Vektor kecepatan, dimensi, dan *pitch angle* propeller turbin Kaplan

Persamaan torsi keluaran turbin harus disesuaikan dengan kondisi lapangan dan dimensi turbin melalui penurunan Persamaan 2.12 (Crwaford, A., et all., 2011).

$$dF_{a/p} = \frac{dmV_{rel}}{dt} \quad (3.8)$$

Kecepatan tangensial akibat putaran turbin didefinisikan sebagai:

$$V_t = \omega r \quad (3.9)$$

Kecepatan propeller yang searah dengan datangnya air adalah:

$$V_y = V_t \sin \beta \quad (3.10)$$

$V_{rel}$  merupakan resultan dari kecepatan datangnya air dan kecepatan propeller yang searah dengan air. Asumsi yang digunakan adalah datangnya air tegak lurus terhadap propeller:

$$V_{rel} = V_{air} - V_y \quad (3.11)$$

Substitusi Persamaan 3.11 dan Persamaan 3.9 & 3.10,

$$V_{rel} = V_{air} - V_t \sin \beta \quad (3.12)$$

$$V_{rel} = V_{air} - \omega r \sin \beta \quad (3.13)$$

Persamaan turunan gaya yang diberikan air pada propeller:

$$dF_{a/p} = \frac{dmV_{rel}}{dt} \quad (3.14)$$

dm dan dVol merupakan massa dan volume air yang mengenai propeller pada kondisi sesaat,

$$dm = \rho dVol \quad (3.15)$$

$$dVol = hV_{air} dt dr \quad (3.16)$$

Substitusi Persamaan 3.14 dan Persamaan 3.15 & 3.16,

$$dF_{a/p} = \frac{\rho h V_{air} dt dr V_{rel}}{dt} \quad (3.17)$$

$$dF_{a/p} = \rho h V_{air} V_{rel} dr \quad (3.18)$$

Substitusi Persamaan 3.18 dan Persamaan 3.13,

$$dF_{a/p} = \rho h V_{air} (V_{air} - \omega r \sin \beta) dr \quad (3.19)$$

Persamaan 3.19 berlaku untuk 1 buah propeller. Karena terdapat 4 buah propeller, maka persamaan berubah menjadi:

$$dF_{a/p} = 4\rho h V_{air} (V_{air} - \omega r \sin \beta) dr \quad (3.20)$$

Perkalian dengan r pada kedua ruas,

$$r dF_{a/p} = 4\rho h V_{air} (V_{air} - \omega r \sin \beta) r dr \quad (3.21)$$

Integral kedua ruas,

$$\int r dF_{a/p} = \int 4\rho h V_{air} (V_{air} - \omega r \sin \beta) r dr \quad (3.22)$$

$$F_{a/p} r = 4\rho h V_{air} \left( \frac{V_{air} r^2}{2} - \frac{r^3 \omega \sin \beta}{3} \right) \quad (3.23)$$

Karena  $\tau = F_{a/p} r$ , maka diperoleh persamaan torsi:

$$\tau = 4\rho h V_{air} \left( \frac{V_{air} r^2}{2} - \frac{r^3 \omega \sin \beta}{3} \right) \quad (3.24)$$

Berdasarkan Gambar 3.6, Gambar 3.8, dan Sub Subbab 3.5.2 mengenai dimensi turbin, maka diperoleh beberapa nilai yang dapat langsung dimasukkan ke dalam Persamaan 3.24, antara lain:  $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$

Diasumsikan pengaruh lebar *hub* kecil, sehingga:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1,08}{2} = 0,54 \text{ m}$$

Diasumsikan propeller berbentuk persegi sehingga  $d = r = 0,54 \text{ m}$ .

$$h = d \sin \beta = 0,54 \sin \beta$$

Sehingga Persamaan 3.24 berubah menjadi:

$$\tau = 4.1000.0,54 \sin \beta V_{air} \left( \frac{V_{air} r^2}{2} - \frac{r^3 \omega \sin \beta}{3} \right) \quad (3.25)$$

$$\tau = 2160 \sin \beta V_{air} \left( \frac{V_{air} r^2}{2} - \frac{r^3 \omega \sin \beta}{3} \right) \quad (3.26)$$

Blok pemodelan dengan Simulink yang mencakup subsistem turbin Kaplan, *gearbox*, dan generator beserta persamaan matematis yang digunakan ditunjukkan lengkap pada bagian Lampiran.

### 3.7 Parameter Input

Terdapat 4 input yang diberikan pada pemodelan di Simulink, yaitu:

a. Debit Air (Q)

Debit air ditetapkan berdasarkan data dari lapangan, yaitu  $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

b. *Pitch Angle* ( $\beta$ )

*Pitch angle* menjadi salah satu parameter yang divariasikan berdasarkan penelitian terdahulu (Susanto, A., 2013).



Terdapat 5 nilai *pitch angle* yang telah diuji, antara lain:  $15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $55^\circ$ . Pada penelitian kali ini akan diuji sejumlah nilai *pitch angle* untuk didapatkan kisaran nilai *pitch angle* terbaik yang menjadi indikator torsi, daya, dan efisiensi turbin terbaik.

Nilai  $\beta$  yang diuji:  $5^\circ$  -  $25^\circ$

Pemilihan nilai  $\beta$  tersebut didasarkan atas kondisi mesin induksi yang harus menghasilkan kecepatan putaran rotor ( $\omega_g$ ) di atas synchronous speed ( $\omega_s$ ) sehingga slip rotor yang dihasilkan bernilai negatif (-). Mengacu pada Persamaan 2.23, jika slip yang dihasilkan bernilai negatif maka mesin berfungsi sebagai generator.

c. Diameter Turbin (D)

Nilai D didapatkan dari Persamaan 3.4 berdasarkan debit yang mengenai turbin.

Diperoleh  $D = 1,08 \text{ m}$ .

Nilai ini tidak akan berubah karena nilai Q juga tidak berubah.

d. Gear Ratio (n)

Ditetapkan 3 nilai n pada penelitian kali ini untuk dilihat pengaruhnya terhadap keluaran turbin, baik torsi, daya, dan efisiensi serta keluaran generator yang berupa torsi elektrik dan daya elektrik. Perbedaan nilai n tentu akan mempengaruhi konversi kecepatan putaran turbin menjadi kecepatan putaran rotor generator yang menjadi masukan bagi proses di generator. Nilai n yang akan diuji antara lain:

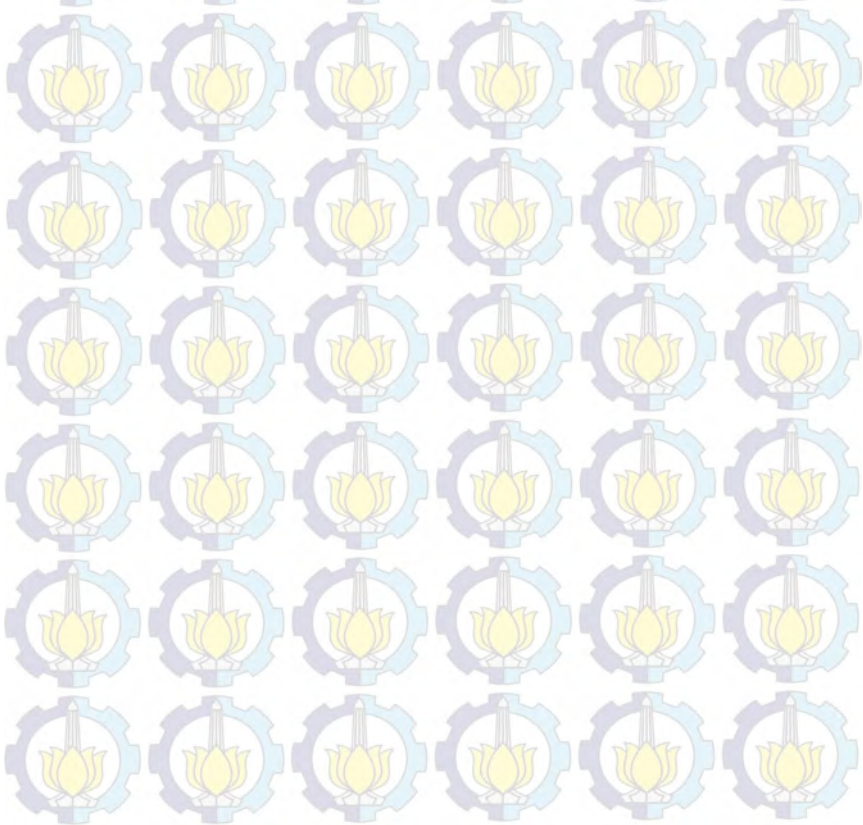
$$n_1 = 5$$

$$n_2 = 6$$

$$n_3 = 7$$

### 3.8 Analisis Hasil Pemodelan

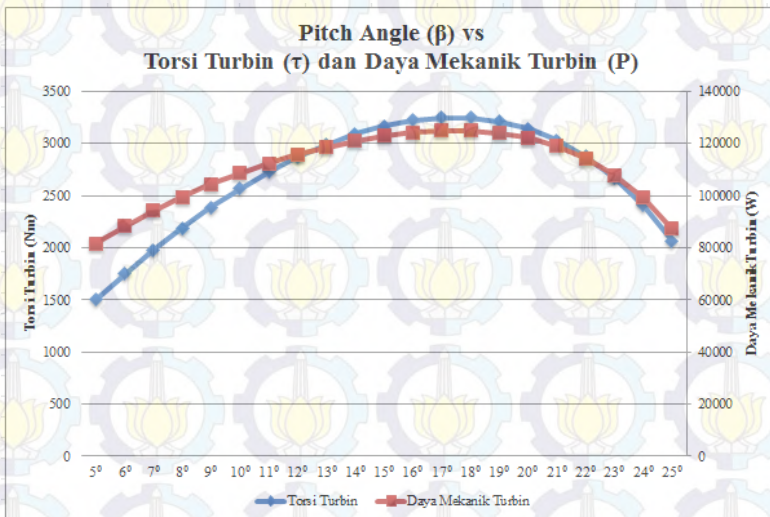
Dari pemodelan yang telah dilakukan dengan Simulink, akan diperoleh hasil berupa hubungan antara *pitch angle* dengan torsi turbin, daya turbin dan efisiensi turbin. Kemudian, juga dapat dianalisis hubungan antara *pitch angle* dengan kecepatan putaran rotor generator, torsi elektrik, dan daya elektrik pada 3 kondisi *gear ratio* yang berbeda. Selain itu juga akan diberikan skema turbin air yang optimal sebagai rekomendasi pemanfaatan air keluaran *discharge channel* untuk sistem PLTA.



## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hubungan *Pitch Angle* dengan Torsi Turbin dan Daya Mekanik Turbin

Torsi yang dihasilkan turbin diperoleh melalui Persamaan 3.24. Sementara daya mekanik yang dihasilkan turbin merupakan perkalian antara torsi keluaran turbin dengan kecepatan putaran turbin seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.13. Pemodelan pada Simulink mendapatkan hasil sebagai berikut.



**Gambar 4.1** Grafik hubungan *pitch angle* dengan torsi dan daya mekanik turbin

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa torsi turbin sebanding dengan daya mekanik turbin. Semakin besar torsi maka semakin besar pula daya mekaniknya, begitupun sebaliknya. Terlihat bahwa torsi besar didapat pada kisaran *pitch angle* 15° – 20° dengan nilai maksimum sebesar 3.249,7 Nm pada *pitch angle* 17°. Hal ini berdampak pada daya mekanik turbin yang juga bernilai besar

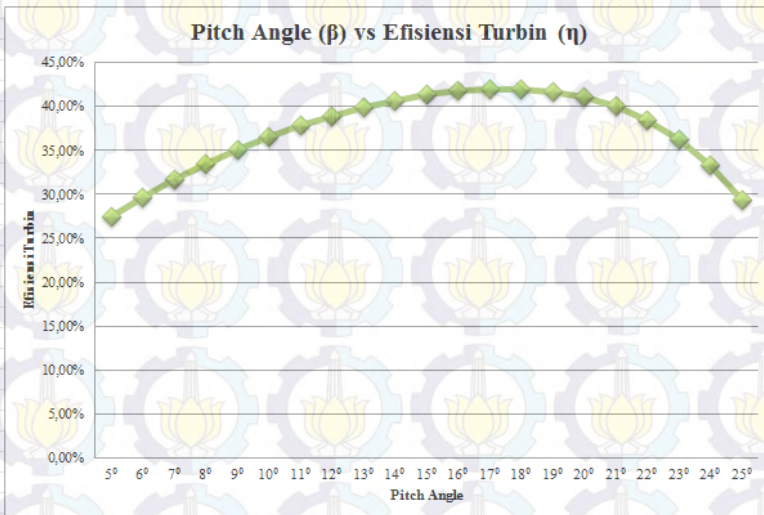


kisaran *pitch angle* tersebut dengan nilai maksimum 124.987,1 W atau 125 kW.

#### 4.2 Hubungan *Pitch Angle* dengan Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin didapat dari Persamaan 2.14, yaitu perbandingan antara perkalian torsi dan kecepatan putaran turbin dengan daya aliran air yang mengenai turbin. Daya aliran air ditetapkan seragam, yaitu:

$$\begin{aligned} P_{air} &= \rho Q g h \\ &= 1000 \cdot 7,6 \cdot 9,8 \cdot 4 \\ &= 297920 \text{ watt} \end{aligned} \quad (4.1)$$

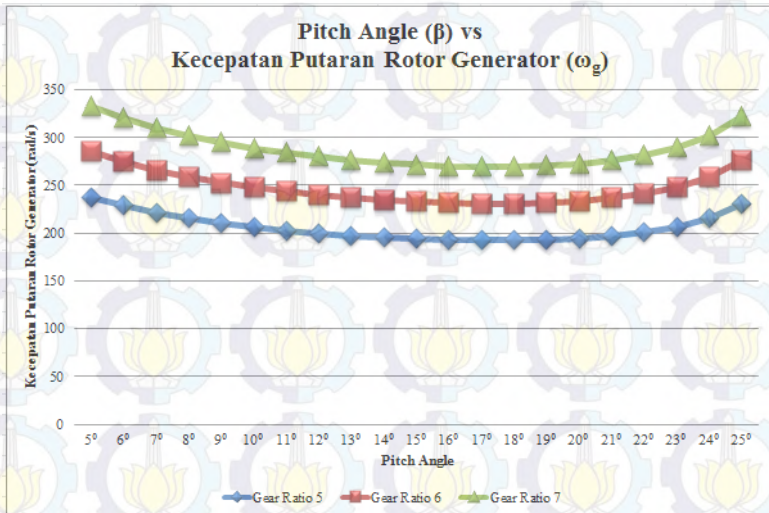


**Gambar 4.2** Grafik hubungan *pitch angle* dengan efisiensi turbin

Pada Gambar 4.2 terlihat hasil yang sebanding dengan Gambar 4.1 Nilai efisiensi turbin maksimal dicapai pada *pitch angle* 17° dengan nilai 41,95 %. Pada *pitch angle* tersebut, turbin mampu mengekstrak energi dari aliran air secara maksimal menjadi energi mekanik berupa putaran.

### 4.3 Hubungan *Pitch Angle* dengan Kecepatan Putaran Rotor Generator

Kecepatan putaran rotor generator merupakan keluaran dari sistem *gearbox* yang mengkonversikan daya mekanik turbin menjadi putaran rotor generator.

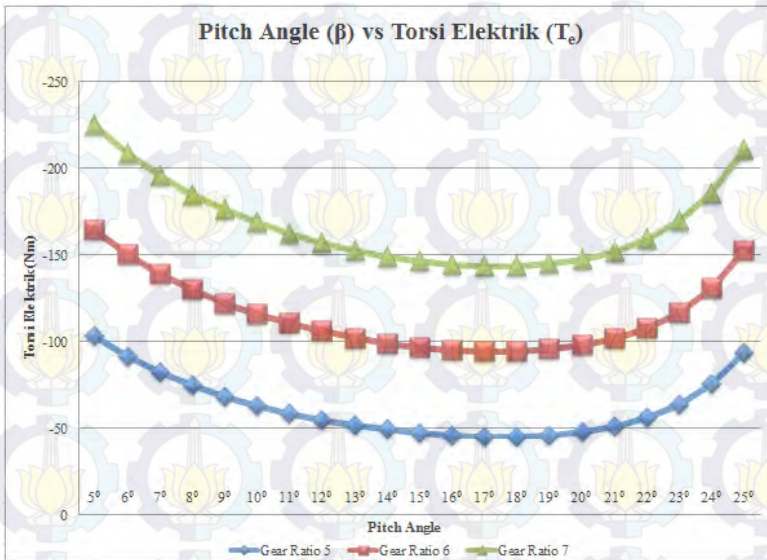


**Gambar 4.3** Grafik hubungan *pitch angle* dengan kecepatan putaran rotor generator

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa variasi *gear ratio* berpengaruh pada kecepatan putaran rotor generator yang dihasilkan. Semakin besar *gear ratio* (semakin banyak perbedaan *teeth gear*) maka semakin cepat putaran pada rotor generator. Hal menarik terlihat pada *pitch angle* 17° yang notabene *pitch angle* optimal untuk efisiensi turbin justru membuat kecepatan putaran rotor generator semakin lambat. Pada *pitch angle* ini, kecepatan putaran rotor generator yang dihasilkan adalah 192,3 rad/s (*gear ratio* 5), 230,8 rad/s (*gear ratio* 6), dan 269,3 rad/s (*gear ratio* 7). Hal ini mengindikasikan bahwa torsi dan daya mekanik turbin berbanding terbalik dengan kecepatan putaran rotor generator.

#### 4.4 Hubungan *Pitch Angle* dengan Torsi Elektrik

*Pitch angle* juga mempengaruhi torsi elektrik yang dihasilkan generator. Pada Gambar 4.4 torsi elektrik bernilai negatif menunjukkan bahwa mesin induksi beroperasi sebagai generator sesuai definisi pada Sub Subbab 2.7.2.



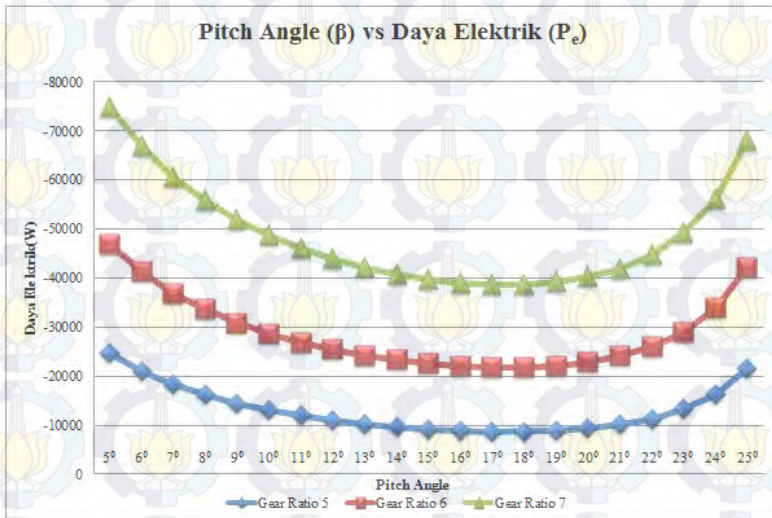
**Gambar 4.4** Grafik hubungan *pitch angle* dengan torsi elektrik

Nilai torsi elektrik sebanding dengan kecepatan putaran rotor generator sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4 yang menempatkan nilai torsi elektrik terendah pada *pitch angle* 17° dan semakin meningkat seiring dengan pertambahan *gear ratio*. Pada *pitch angle* optimal turbin, yaitu 17° diperoleh torsi elektrik -45,17 Nm (*gear ratio* 5), -94,36 Nm (*gear ratio* 6), dan -143,5 Nm (*gear ratio* 7).



#### 4.5 Hubungan *Pitch Angle* dengan Daya Elektrik

Daya elektrik dipengaruhi oleh torsi elektrik sesuai Persamaan 2.27 dan otomatis dipengaruhi pula oleh *pitch angle*. Nilai torsi elektrik negatif (-) yang menandakan bahwa mesin induksi beroperasi sebagai generator juga membuat daya elektrik bernilai negatif (-).



**Gambar 4.5** Grafik hubungan *pitch angle* dengan daya elektrik

Berdasarkan Gambar 4.5, daya elektrik sebanding dengan torsi elektrik dan kecepatan putaran rotor generator. Pada pitch angle optimal turbin, yaitu 17°, didapat daya elektrik sebesar -8.687,3 W (gear ratio 5), -21.776,9 W (gear ratio 6), dan -38.650,5 W (gear ratio 7).

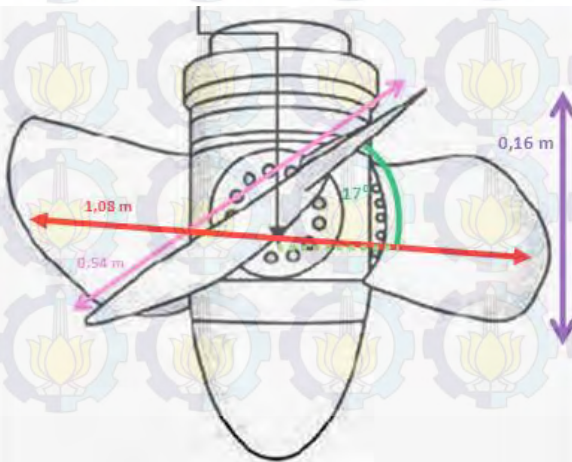
Selain beberapa grafik di atas, juga dapat dianalisis beberapa hal, antara lain: variasi *gear ratio* tidak berpengaruh pada torsi, daya mekanik, dan efisiensi turbin karena sistem *gearbox* hanya mempengaruhi keluaran sistem itu sendiri, dalam hal ini adalah kecepatan putaran rotor generator. Kecepatan putaran rotor

generator nantinya mempengaruhi torsi elektrik dan daya elektrik yang dihasilkan generator.

Untuk komponen turbin pada sistem PLTA ini, pengujian data dibatasi antara nilai *pitch angle*  $5^{\circ}$  -  $25^{\circ}$  dikarenakan nilai *pitch angle* di luar itu menyebabkan torsi bernilai negatif (-) sehingga daya mekanik juga bernilai negatif. Hal ini mengakibatkan efisiensi akan semakin bertambah ke arah negatif. Kondisi ini tidak sesuai dengan kondisi aktual (efisiensi mencapai lebih dari 100% ke arah negatif). Penyebab lain ialah, nilai *pitch angle* di luar kisaran angka di atas menyebabkan kecepatan putaran rotor generator lebih kecil daripada *synchronous speed* generator. Hal ini menyebabkan mesin induksi tidak dapat beroperasi sebagai generator karena slip yang dihasilkan rotor bernilai positif (+).

#### 4.6 Skema Turbin Optimal

Lima subbab sebelumnya telah memperjelas parameter pemilihan turbin Kaplan yang direkomendasikan dalam perancangan sistem PLTA. Skema turbin optimal yang telah diperoleh dalam penelitian ini berikut parameternya adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.6** Skema optimal turbin Kaplan

D (diameter turbin)	= 1,08 m
d (lebar propeller)	= 0,54 m
$\beta$ (pitch angle)	= optimal pada $17^\circ$
h (tinggi propeller)	= $0,54 \cdot \sin 17^\circ = 0,16$ m
Z (jumlah propeller)	= 4 bilah

Dengan skema turbin optimal seperti Gambar 4.6, diperoleh:

Torsi turbin	= 3.249,7 Nm
Daya mekanik turbin	= 125 kW
Efisiensi turbin	= 41,95 %

Kecepatan putaran rotor generator, torsi elektrik, dan daya elektrik tertinggi diperoleh pada gear ratio 7, sehingga:

Kecepatan putaran rotor generator	= 269,3 rad/s
Torsi elektrik	= -143,5 Nm
Daya elektrik	= -38,65 kW

Torsi dan daya elektrik bernilai negatif (-) berarti mesin induksi tersebut berfungsi sebagai generator yang menghasilkan listrik.

Berdasarkan Gambar 3.3, listrik yang dihasilkan generator merupakan listrik bolak – balik yang akan disearahkan karena reservoir energi pada sistem PLTA ini tidak tentu. Setelah itu, listrik akan dirubah lagi menjadi listrik bolak – balik oleh DC/AC inverter karena kebutuhan listrik yang disalurkan menuju tegangan jala – jala adalah listrik bolak – balik.





## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada pengerjaan tugas akhir ini diperoleh beberapa kesimpulan, antara lain sebagai berikut:

- a. Hasil pengujian pemodelan dengan Simulink menunjukkan bahwa *pitch angle*  $17^{\circ}$  merupakan *pitch angle* yang paling optimal karena menghasilkan torsi turbin Kaplan terbesar, yaitu 3.249,7 Nm dengan daya mekanik turbin 125 kW dan efisiensi turbin 41,95 %.
- b. Nilai *pitch angle*  $17^{\circ}$  menghasilkan kecepatan putaran rotor generator sebesar 269,3 rad/s, torsi elektrik -143,5 Nm, dan daya elektrik -38,65 kW dengan *gear ratio* optimal yang digunakan adalah *gear ratio* 7.
- c. Skema optimal turbin Kaplan yang dirancang berdasarkan pemodelan matematis sesuai kondisi lapangan mendapatkan hasil dengan parameter turbin sebagai berikut: D (diameter turbin) 1,08 m; d (lebar propeller) 0,54 m;  $\beta$  (*pitch angle*)  $17^{\circ}$ ; h (tinggi propeller) 0,16 m; dan Z (jumlah propeller) 4 bilah.
- d. Energi listrik yang dihasilkan sistem PLTA ini dapat digunakan untuk memenuhi konsumsi energi listrik di lingkungan PLTU sebagai sumber energi *auxiliary*, yaitu sumber energi untuk peralatan – peralatan pendukung proses.

### 5.2 Saran

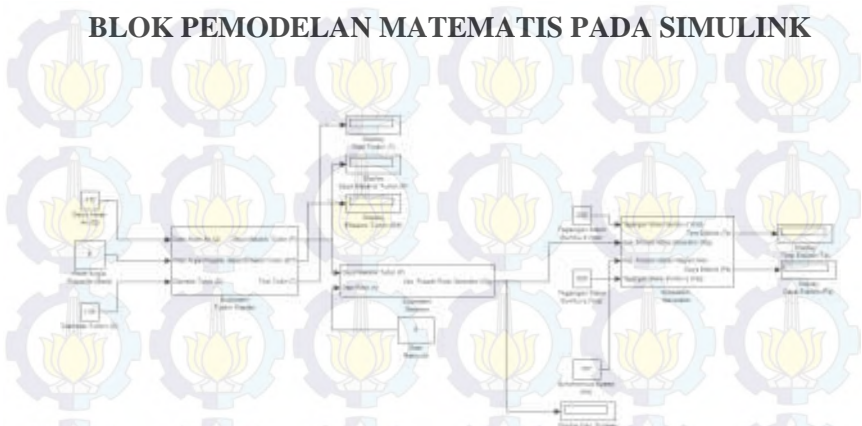
Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah perancangan sistem PLTA yang lebih optimal dengan menggunakan generator sinkron serta pengembangan sistem PLTA untuk unit PLTU yg lain.



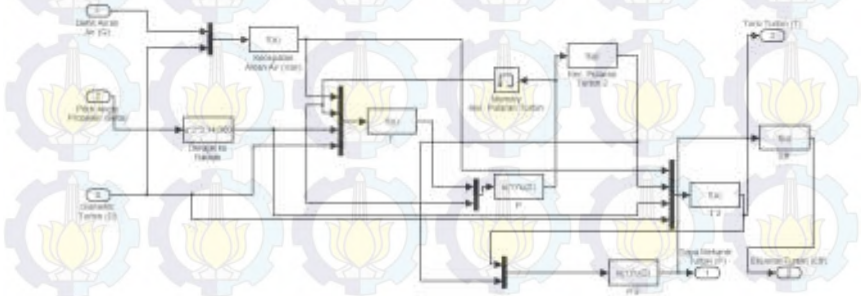


## LAMPIRAN A

### BLOK PEMODELAN MATEMATIS PADA SIMULINK



Pemodelan pada keseluruhan sistem



Pemodelan pada subsistem turbin kaplan

Expression:

$$u(1)/((u(2)^2)^{3.14/4})$$

Blok *user defined function* (UDF) kecepatan aliran air ( $V_{\text{air}}$ )

Expression:

$$u^2 * 3.14 / 360$$

Blok UDF derajat ke radian (satuan sudut yang dimasukkan dalam persamaan UDF harus dalam bentuk radian)

Expression:

$$2160 * (\sin(u(3))) * u(1) * (((u(1) * ((u(4)/2)^2))/2) - (((u(4)/2)^3 * u(2) * (\sin(u(3))))/3))$$

Blok UDF torsi turbin ( $\tau$ )

Expression:

$$u(1) * u(2)$$

Blok UDF daya turbin (P)

Expression:

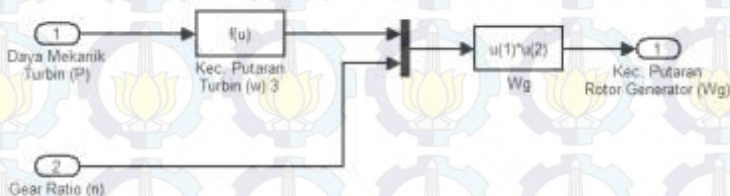
$$840.89 * 6.28 / 60 * (4^{(5/4)}) / ((u/746)^{(1/2)})$$

Blok UDF kecepatan putaran turbin ( $\omega$ )

Expression:

$$u / (7.6 * 1000 * 9.8 * 4)$$

Blok UDF efisiensi turbin ( $\eta$ )

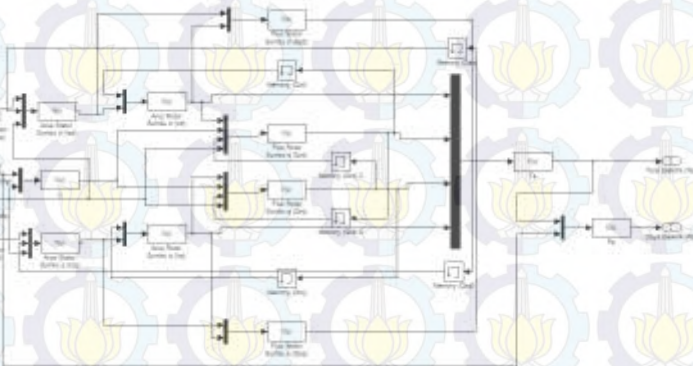


Pemodelan pada subsistem *gearbox*

Expression:

$$u(1)*u(2)$$

Blok UDF kecepatan putaran keluaran *gearbox* yang menjadi kecepatan putaran rotor generator ( $\omega_g$ )



Pemodelan pada subsistem generator

Expression:

$$(u(2)-u(1))/u(2)$$

Blok UDF slip rotor (s)

Expression:

$$(u(1)-(u(2)*u(3)))/(7.78)$$

Blok UDF arus stator sumbu d ( $I_{sd}$ )

Expression:

$$(u(1)+(u(2)*u(3)))/(7.78)$$

Blok UDF arus stator sumbu q ( $I_{sq}$ )



Expression:

$$(u(1)-(142*u(2)))/6.28$$

Blok UDF arus rotor sumbu d ( $I_{rd}$ )

Expression:

$$(u(1)-(142*u(2)))/6.28$$

Blok UDF arus rotor sumbu q ( $I_{rq}$ )

Expression:

$$(u(1)*11.62)+(u(2)*142)$$

Blok UDF fluks magnetik stator sumbu d ( $\varphi_{sd}$ )

Expression:

$$(u(1)*11.62)+(u(2)*142)$$

Blok UDF fluks magnetik stator sumbu q ( $\varphi_{sq}$ )

Expression:

$$(7.1*u(1))+(u(2)*u(3)*u(4))$$

Blok UDF fluks magnetik rotor sumbu d ( $\varphi_{rd}$ )

Expression:

$$(7.1*u(1))-(u(2)*u(3)*u(4))$$

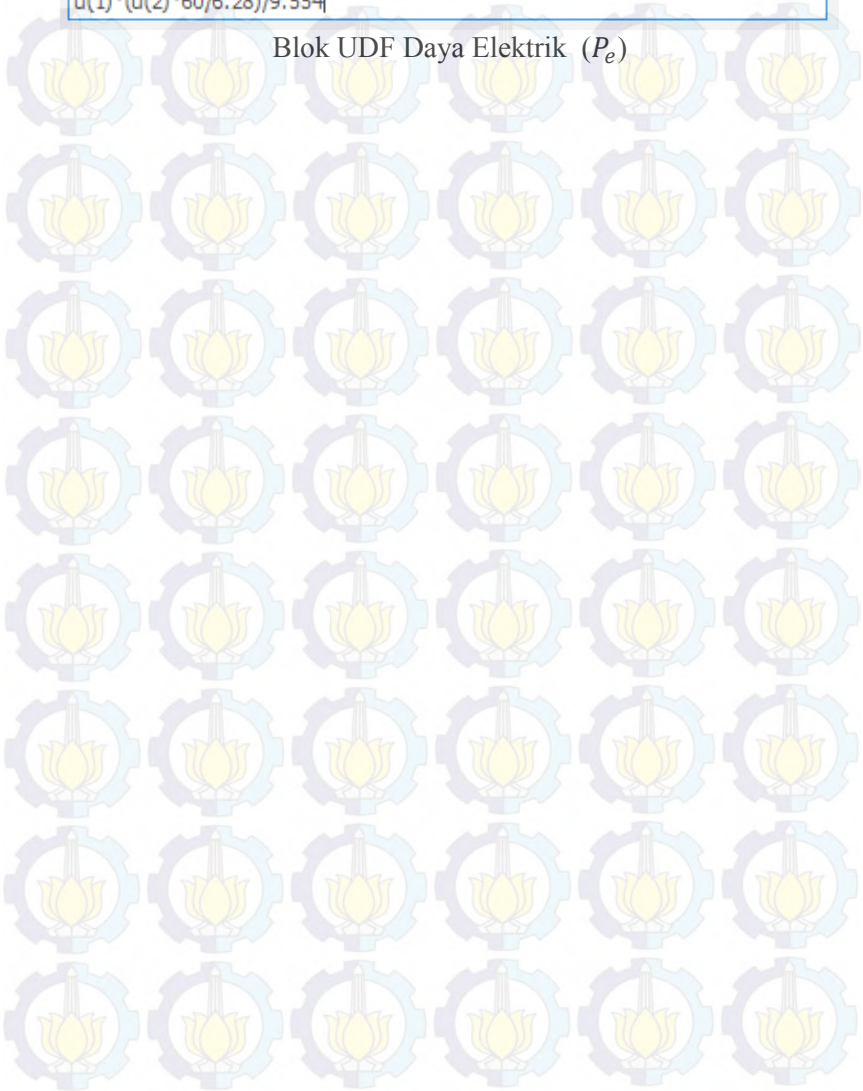
Blok UDF fluks magnetik rotor sumbu q ( $\varphi_{rq}$ )

Expression:

$$(u(3)*u(1))-(u(2)*u(4))$$

Blok UDF Torsi Elektrik ( $T_e$ )

Expression:

$$u(1)*(u(2)*60/6.28)/9.554|$$
Blok UDF Daya Elektrik ( $P_e$ )

## LAMPIRAN B

**TABEL PENGAMBILAN DATA HASIL PEMODELAN**

<i><b>Gear Ratio</b></i>	<i><b>Pitch Angle</b></i>	<b>Torsi Turbin (Nm)</b>	<b>Daya Mekanik Turbin (W)</b>	<b>Efisiensi Turbin</b>	<b>Kec. Putaran Rotor (rad/s)</b>	<b>Torsi Elektrik (Nm)</b>	<b>Daya Elektrik (W)</b>
Gear Ratio 5	5 <sup>0</sup>	1501,2	81750	27,44%	237,8	-103,3	-24572,8
	6 <sup>0</sup>	1747,1	88395,9	29,67%	228,7	-91,6	-20965,6
	7 <sup>0</sup>	1976,8	94302,7	31,65%	221,4	-82,37	-18237,6
	8 <sup>0</sup>	2190,1	99595,6	33,43%	215,4	-74,74	-16103,3
	9 <sup>0</sup>	2386,5	104352,5	35,03%	210,5	-68,39	-14394,9
	10 <sup>0</sup>	2565,6	108620,9	36,46%	206,3	-63,05	-13007,2
	11 <sup>0</sup>	2726,6	112426,7	37,74%	202,8	-58,54	-11871,9
	12 <sup>0</sup>	2868,7	115778,1	38,86%	199,8	-54,76	-10943,3
	13 <sup>0</sup>	2990,8	118668,9	39,83%	197,4	-51,63	-10191,1
	14 <sup>0</sup>	3091,5	121078,5	40,64%	195,4	-49,11	-9595,9
	15 <sup>0</sup>	3169,5	122971,8	41,28%	193,9	-47,18	-9147,3
	16 <sup>0</sup>	3222,9	124297,9	41,72%	192,9	-45,85	-8842,6



Gear Ratio 6	17 <sup>0</sup>	3249,7	124987,1	41,95%	192,3	-45,17	-8687,3
	18 <sup>0</sup>	3247,4	124946,6	41,94%	192,4	-45,21	-8696,3
	19 <sup>0</sup>	3213	124055,7	41,64%	193	-46,09	-8897,7
	20 <sup>0</sup>	3143	122156,4	41,00%	194,5	-48	-9338,54
	21 <sup>0</sup>	3033,1	119042,2	39,96%	197,1	-51,24	-10097
	22 <sup>0</sup>	2878	114440,5	38,41%	201	-56,25	-11306,3
	23 <sup>0</sup>	2671,2	107897,7	36,25%	206,9	-63,82	-13205,1
	24 <sup>0</sup>	2404,3	99191,3	33,29%	215,9	-75,3	-16257,2
	25 <sup>0</sup>	2066,8	87371,8	29,33%	230	-93,38	-21481,2
	5 <sup>0</sup>	1501,2	81750	27,44%	285,4	-164,2	-46843,6
	6 <sup>0</sup>	1747,1	88395,9	29,67%	274,4	-150,2	-41210
	7 <sup>0</sup>	1976,8	94302,7	31,65%	265,7	-139	-36931,1
	8 <sup>0</sup>	2190,1	99595,6	33,43%	258,5	-129,8	-33570,3
	9 <sup>0</sup>	2386,5	104352,5	35,03%	252,6	-122,2	-30870,7
	10 <sup>0</sup>	2565,6	108620,9	36,46%	247,6	-115,8	-28671,2
	11 <sup>0</sup>	2726,6	112426,7	37,74%	243,3	-110,4	-26866,7
	12 <sup>0</sup>	2868,7	115778,1	38,86%	239,8	-105,9	-25387
	13 <sup>0</sup>	2990,8	118668,9	39,83%	236,9	-102,1	-24185,8

Gear Ratio 7	14 <sup>0</sup>	3091,5	121078,5	40,64%	234,5	-99,08	-23233,7
	15 <sup>0</sup>	3169,5	122971,8	41,28%	232,7	-96,77	-22514,9
	16 <sup>0</sup>	3222,9	124297,9	41,72%	231,4	-95,18	-22026,2
	17 <sup>0</sup>	3249,7	124987,1	41,95%	230,8	-94,36	-21776,9
	18 <sup>0</sup>	3247,4	124946,6	41,94%	230,8	-94,41	-21791,4
	19 <sup>0</sup>	3213	124055,7	41,64%	231,7	-95,46	-22114,6
	20 <sup>0</sup>	3143	122156,4	41,00%	233,4	-97,76	-22821,4
	21 <sup>0</sup>	3033,1	119042,2	39,96%	236,5	-101,6	-24035,5
	22 <sup>0</sup>	2878	114440,5	38,41%	241,2	-107,7	-25965,9
	23 <sup>0</sup>	2671,2	107897,7	36,25%	248,3	-116,7	-28985,3
	24 <sup>0</sup>	2404,3	99191,3	33,29%	259,1	-130,5	-33813
	25 <sup>0</sup>	2066,8	87371,8	29,33%	276	-152,2	-42016,9
	5 <sup>0</sup>	1501,2	81750	27,44%	332,9	-225	-74899,8
	6 <sup>0</sup>	1747,1	88395,9	29,67%	320,2	-208,7	-66804,9
	7 <sup>0</sup>	1976,8	94302,7	31,65%	310	-195,6	-60639,8
	8 <sup>0</sup>	2190,1	99595,6	33,43%	301,6	-184,9	-55786,1
	9 <sup>0</sup>	2386,5	104352,5	35,03%	294,7	-176,1	-51878,9
	10 <sup>0</sup>	2565,6	108620,9	36,46%	288,8	-168,6	-48685,5



11 <sup>0</sup>	2726,6	112426,7	37,74%	283,9	-162,3	-46068,3
12 <sup>0</sup>	2868,7	115778,1	38,86%	279,8	-157	-43915,8
13 <sup>0</sup>	2990,8	118668,9	39,83%	276,3	-152,6	-42166,1
14 <sup>0</sup>	3091,5	121078,5	40,64%	273,6	-149,1	-40777,7
15 <sup>0</sup>	3169,5	122971,8	41,28%	271,4	-146,4	-39728,7
16 <sup>0</sup>	3222,9	124297,9	41,72%	270	-144,5	-39014,9
17 <sup>0</sup>	3249,7	124987,1	41,95%	269,3	-143,5	-38650,5
18 <sup>0</sup>	3247,4	124946,6	41,94%	269,3	-143,6	-38671,8
19 <sup>0</sup>	3213	124055,7	41,64%	270,3	-144,8	-39144
20 <sup>0</sup>	3143	122156,4	41,00%	272,4	-147,5	-40176
21 <sup>0</sup>	3033,1	119042,2	39,96%	275,9	-152	-41947
22 <sup>0</sup>	2878	114440,5	38,41%	281,4	-159,1	-44758,3
23 <sup>0</sup>	2671,2	107897,7	36,25%	289,7	-169,7	-49145,2
24 <sup>0</sup>	2404,3	99191,3	33,29%	302,2	-185,7	-56137
25 <sup>0</sup>	2066,8	87371,8	29,33%	322	-211	-67965,8



## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, I. I. (2003). Studi Kelayakan dan Penyusunan Basic Design Proyek PLTA Siteki. Vol. 1 Bab 3 “Parameter Design Optimum”.
- Chapman, S. J., (2005). Electric Machinery Fundamentals 4<sup>th</sup> edition.
- Crawford, A., Motley, J. (2011). Modeling Torque of a Hydro-Turbine.
- Farzi, A. (2015). Sistem Pendingin. PT. PJB UP Gresik.
- Fletcher, J., Yang, J. Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications. Paths to Sustainable Energy. University of Strathclyde, Glasgow.
- Girsang, L. J. (2010). Generator. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Gustafsson, M. (2013). Improved Governing of Kaplan Turbine Hydropower Plants Operating Island Grids. KTK Electrical Engineering. Stockholm.
- Hasbullah. (2009). Konversi Energi Air. Teknik Elektro FPTK. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung.
- <http://cink-hydro-energy.com> diakses 6 Januari 2016 pukul 09.00.
- [http:// directindustry.com/prod/eisenbeiss-gmbh/product-108031-1053349.html](http://directindustry.com/prod/eisenbeiss-gmbh/product-108031-1053349.html) diakses 14 Januari 2016 pukul 14.00.
- [http://engineeringtoolbox.com/electrical-motors-hp-torque-rpm-d\\_1503.html](http://engineeringtoolbox.com/electrical-motors-hp-torque-rpm-d_1503.html) diakses 13 Januari 2016 pukul 17.00.
- <http://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/gearbox-guide.php#sthash.85DBel5x.dpbs> diakses 15 Januari pukul 01.00.
- Jumawa, C. (2013). Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Group Riset CFD Indonesia. Ahmad Indra Research. Universitas Indonesia. Depok.
- Luknanto, D. (2013). Bangunan Tenaga Air. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

- Martinez, J. (2007). Modelling and Control of Wind Turbines. Department of Chemical Engineering and Chemical Technology. Imperial College London.
- Martins, M., Perdana, A., Ledesma, P., Agneholm, E., Carlsson, O. (2007). Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data. *Renewable Energy* Vol. 32, 1301 – 1316.
- Niptro, R., Faizal, M., Listiono, H., Cahyono, F.T., Candra, F.A., Hidayat, I. (2013). Kondensor. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik. Universitas Riau. Pekanbaru.
- Patty, O. F. (1995). Tenaga Air. Surabaya: Erlangga.
- Permatasari, R. (2008). Universitas Diponegoro. Semarang.
- Scutaru, G., Apostoia, C. Matlab–Simulink Model of a Stand-Alone Induction Generator. *Journal of Electrical Engineering*.
- Slemon, G. (1989). Modelling Induction Machines for Electric Drives. *IEEE Transaction on Industry Application*.
- Susanto, A. (2013). Perancangan dan Pengujian Turbin Kaplan pada Ketinggian (H) 4 m Sudut Sudu Pengarah  $30^0$  dengan Variabel Perubahan Debit (Q) dan Sudut Sudu Jalan. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah. Surakarta.
- Syamsurijal. (2009). Analisis Sistem Kogenerasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tello Makassar. *Media Elektrik* Vol. 4 No. 1.

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di kota Tangerang, 22 September 1994. Penulis menempuh pendidikan di SD Margie Surabaya lulus tahun 2006, SMP Margie Surabaya lulus tahun 2009, dan SMA Margie Surabaya lulus tahun 2012. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2012. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan HMTF ITS dan BEM ITS selama periode 2013 - 2014 di Departemen Kesejahteraan Mahasiswa. Penulis juga bergabung di Optical Society of America Student Chapter (OSA SC) ITS selama periode 2014 – 2016. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan selama periode 2013 – 2015. Penulis mempunyai pengalaman *internship program* selama 1 bulan di PT. Perusahaan Gas Negara (PGN) Persero Tbk. Bidang minat penulis adalah energi terbarukan, rekayasa energi, dan pengkondisian lingkungan. Penulis dapat dihubungi melalui email [alvienks@gmail.com](mailto:alvienks@gmail.com).